

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
SEDE VIÑA DEL MAR – JOSE MIGUEL CARRERA

**INTERFERENCIAS EN LOS MODELOS DE ANÁLISIS DE
CONSECUENCIAS PARA EFECTOS MECÁNICOS ASOCIADOS AL
ALMACENAMIENTO DE SUSTANCIAS INFLAMABLES**

Trabajo de Titulación para optar al
Título Profesional de Ingeniero en
PREVENCIÓN DE RIESGOS
LABORALES Y AMBIENTALES

Alumno:

Víctor-Hugo Barrientos Mansilla

Profesor Guía:

Ing. Leonor Cabello Arellano

DEDICATORIA

Este trabajo de tesis es el resultado de un largo camino recorrido, no exento de tropiezos y momentos duros, que hoy finalizan con emoción y orgullo. Sin el apoyo constante de mi familia y cercanos habría sido imposible de alcanzar.

Dedico estas líneas a mi madre, quién ya no está con nosotros y que siempre quiso que finalice mis estudios con dignidad, profesionalismo y calidad. Ella me entregó las herramientas emocionales que se requieren para enfrentar momentos difíciles en la vida.

A mi padre, quien me enseñó la disciplina, coraje y constitución para ir siempre de frente en la vida y asumir el compromiso que figura en la incapacidad de renunciar.

A Fabiola, Valentina y Pedro Pablo, por acompañarme en este viaje y entregarme su cariño incondicional en todo momento.

A Daniela, por ser mi guía y compañera permanente en esta última etapa, apoyarme cuando no tenía fuerza e instarme a finalizar este proceso.

A todos ellos, mi eterno reconocimiento. ¡Gracias Familia por tanto!

RESUMEN

Keywords: Sustancias peligrosas – análisis de consecuencias – almacenamiento – aerosoles – TNT equivalente – Multienergía – TNO – explosiones – efectos mecánicos.

El presente trabajo de título ha formulado una metodología para evaluar los criterios de cálculo definidos por la Autoridad Sanitaria y su estándar de referencia en relación al dimensionamiento de efectos mecánicos, a consecuencia de un escenario de explosión al interior de recintos de almacenamiento de aerosoles. Dichas sustancias se componen de un gas propelente, preferentemente en base a propano, que frente a una liberación accidental tienen el potencial de formar atmósferas explosivas.

Para determinar los efectos mecánicos originados por una explosión, se debe determinar la sobrepresión máxima producida por una determinada fuente de origen. Para estimar esta variable, el Ministerio de Salud ha dispuesto de una metodología de cálculo específica, la cual ha demostrado entregar valores muy altos de sobrepresión, sobre todo a cortas distancias de evaluación. El método definido para este escenario corresponde al modelo TNT equivalente, que relaciona la masa de aerosoles almacenada con su expresión en términos de Trinitrotolueno y determina valores de sobrepresión máxima de 125 [mbar] para efectos sobre las personas.

Los principales parámetros utilizados corresponden a la masa de la nube de gas propelente y el volumen que esta ocupa sobre un medio obstruido, como son las bodegas de almacenamiento. También influye el rendimiento de la explosión y la curva característica que describe una deflagración o una detonación, según el grado de confinamiento del escenario.

Los resultados obtenidos en el presente estudio concluyen que el método definido por el Ministerio de Salud no es aplicable para el cálculo de la sobrepresión máxima al interior de bodegas de aerosoles, cuando se requiere evaluar sus efectos en distancias inferiores a 40 [m]. Los elevados valores de sobrepresión, se explican en parte por las características del método utilizado y su pérdida de resolución frente a la evaluación de objetivos a corta distancia. Por este motivo, no es recomendable su uso para determinar la resistencia estructural de los muros perimetrales en cada recinto evaluado, entregando resultados sobredimensionados y fuera del rango de comportamiento habitual para el fenómeno estudiado.

El impacto de la magnitud estimada para la sobrepresión como efecto mecánico sobre una estructura del tipo bodega, tiene una directa influencia sobre su costo de construcción, por cuanto valores más altos de sobrepresión requieren medidas de protección pasiva más caras y de mayor complejidad. Se estima una reducción de un 50% en el costo de materiales de construcción, por efecto del correcto dimensionamiento de los recintos de almacenamiento. Esto implica una caída aproximada en el costo en $[UF/m^2]$ de 35 a 15.

La estimación de la masa total de propano, con capacidad para producir una explosión catastrófica corresponde a una de las interferencias más relevantes para la estimación de efectos mecánicos, identificadas en el presente trabajo, sumado a la distorsión sobre la metodología del Ministerio de Salud, que genera el rendimiento teórico de la explosión.

El análisis de sensibilidad aplicado a los resultados obtenidos demostró que la influencia del rendimiento de la explosión sobre el método recomendado por el Ministerio de Salud, tiene la capacidad para modificar en forma relevante la magnitud de la sobrepresión, a medida que este adquiere valores más pequeños. La distancia objetivo estimada con un rendimiento del 10%, recomendada por el Ministerio de Salud, se reduce a casi la mitad, frente a un escenario de rendimiento del 2%. Lo anterior, genera un rango posible de soluciones que se aleja del objetivo deseado, respecto a determinar la resistencia estructural de las bodegas para almacenamiento de aerosoles.

De esta forma, producto de este estudio, se concluye recomendar un método de cálculo diferente, como el Multi-Energía, que representa un modelo ajustado al comportamiento de una nube de vapor al interior de las bodegas de almacenamiento para aerosoles, junto a medidas de control de riesgos específicas para la prevención y mitigación de accidentes.

ABSTRACT

The present title work has formulated a methodology to evaluate the calculation criteria defined by the Health Authority and the reference standard regarding the dimensioning of mechanical effects, as a result of an explosion scenario inside aerosol storage warehouses. These substances are composed of a propellant gas, preferably based on propane, which, faced with an accidental release, has the potential to form explosive atmospheres.

To determine the mechanical effects caused by an explosion, the maximum overpressure produced by a given source of origin must be determined. To estimate this variable, the Ministry of Health has provided a specific calculation methodology, which has been shown to deliver very high values of overpressure, especially at short evaluation distances. The method defined for this scenario corresponds to the equivalent TNT model, which relates the mass of stored aerosols with its expression in terms of Trinitrotoluene and determines maximum overpressure values of 125 [mbar] for effects on people.

The results obtained in the present study conclude that the method defined by the Ministry of Health is not applicable for the calculation of the maximum overpressure inside the aerosol cellars, when it is required to evaluate its effects in distances less than 40 [m]. The high values of overpressure, are explained in part by the characteristics of the method used and its loss of resolution against the evaluation of objectives at close range. For this reason, its use is not recommended to determine the structural strength of the perimeter walls in each evaluated site, delivering oversized results and outside the usual behavior range for the phenomenon studied.

The impact of the magnitude estimated for overpressure as a mechanical effect on a warehouse structure has a direct influence on its construction cost, as higher values of overpressure require more expensive and more complex passive protection measures. It is estimated a reduction of 50% in the cost of construction materials, due to the correct dimensioning of the storage enclosures. This implies an approximate drop in cost in [UF / m²] from 35 to 15.

The estimation of the total mass of propane, with the capacity to produce a catastrophic explosion, corresponds to one of the most relevant interferences for the estimation of mechanical effects, added to the distortion on the methodology of the Ministry of Health, which generates the theoretical yield of the explosion.

The sensitivity analysis applied to the results obtained showed that the influence of the performance of the explosion on the method recommended by the Ministry of Health, has the capacity to modify in a relevant way the magnitude of the overpressure, as it acquires smaller values. The target distance estimated with a yield of 10%, recommended by the Ministry of Health, is reduced to almost half, compared to a performance scenario of 2%. The above, generates a possible range of solutions that is far from the desired objective, with respect to determining the structural resistance of the storage facilities for aerosols.

In this way, as a result of this study, we conclude recommending a different calculation method, such as the Multi-Energy, which represents a model adjusted to the behavior of a vapor cloud inside the storage cellars for aerosols, together with measures of control of specific risks for the prevention and mitigation of accidents.

ÍNDICE

LISTA DE ABREVIATURAS	9
SIMBOLOGÍA.....	10
LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABLAS.....	12
GLOSARIO.....	13
1. Introducción	15
2. Objetivos	17
2.1. Objetivo general	17
2.2. Objetivos específicos.....	17
3. Justificación.....	18
4. Alcance.....	20
5. Metodología	21
CAPÍTULO 1.0 FENOMENOLOGÍA DE LAS EXPLOSIONES.....	23
1.1 Deflagraciones de gas y vapor inflamable.....	26
1.2 Detonaciones de gas	27
1.3 Deflagraciones por polvo combustible	29
1.4 Explosiones por reacción química.....	31
1.5 Explosiones por material fundido.....	32
1.6 Explosiones de nubes de vapor.....	33
CAPÍTULO 2.0 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS DE SOBREPRESIÓN.....	37
2.1 Método basado en la carga de estallido equivalente en TNT	40
2.1.1 Eficiencia de la explosión para sustancias explosivas	43
2.1.2 Eficiencia de la explosión para nubes de vapor	43
2.1.3 Eficiencia de la explosión estallido de recipientes.....	43
2.1.4 Análisis del método TNT Equivalente	44
2.2 Método basado en la carga de estallido aire-combustible	45
2.2.1 Análisis del método MultiEnergía.....	50

CAPÍTULO 3.0 APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CÁLCULO 52

3.1 Características de diseño de las bodegas de almacenamiento 60

3.2 Aplicación método TNT equivalente 63

3.3 Aplicación método Multi-Energía 65

CAPÍTULO 4.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE MEJORA 69

4.1 Análisis de sensibilidad del modelo 75

4.2 Interpretación física de los resultados 81

4.3 Interpretación económica de los resultados 83

4.4 Optimización de parámetros y modelos de cálculo 85

4.5 Mejoras en las condiciones de diseño y operación de las bodegas 86

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 91

BIBLIOGRAFÍA.....96

ANEXOS.....97

Anexo 1: Gráfico sobrepresión v/s distancia escalada Multi-Energía 98

Anexo 2: Proyectos de sustancias peligrosas evaluados en el SEA 99

Anexo 3: Memoria de cálculo metodología TNT equivalente 104

Anexo 4: Memoria de cálculo metodología Multi-Energía 108

LISTA DE ABREVIATURAS

TNO	Organización holandesa de investigación científica aplicada
MINSAL	Ministerio de Salud
MMARC	Manual de Métodos de Análisis de Riesgos y Consecuencias
MMA	Ministerio de Medio Ambiente
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
RCA	Resolución de Calificación Ambiental
IPVS	Índice Inmediatamente Peligroso para la Vida y Salud
NU	Naciones Unidas
CAS	Número de CAS - <i>Chemical Abstracts Service</i>
NCh	Norma Chilena
CPR	Comité holandés para la prevención de desastres
ATM	Asistencia Técnica y Medio Ambiente
OECD	Organización para el Desarrollo y Cooperación Económica
TNT	Trinitrotolueno
LEL	Límite Inferior de Explosividad
UEL	Límite Superior de Explosividad
VCE	Explosión de Nube de Vapor - <i>Vapor Cloud Explosion</i>
HSE	Oficina Ejecutiva de Seguridad y Salud - <i>Health and Safety Executive</i>
ATEX	Equipos o Dispositivos para Atmósferas Explosivas - <i>Appareils destinés à être utilisés en ATmosphères EXplosives</i>
FEMA	Agencia Federal de Administración de Emergencias - <i>Federal Emergency Management Agency</i>
RF	Resistencia al Fuego
CFD	Dinámicas de Fluido Computacional - <i>Computational Fluid Dynamics</i>
UF	Unidad de Fomento

SIMBOLOGÍA

[mbar]	Milibar de presión
NCh	Norma Chilena
[ton]	Toneladas
[Pa]	Pascales
[°C]	Grado Celsius
[K]	Grado Kelvin
[mmHg]	Milímetros de mercurio
[KJ/Kg]	Kilo Joule por Kilogramo
[KJ/Kg°C]	Kilo Joule por Kilogramo °C
[m/s]	Metros por segundo
[gr/mol]	Gramos por unidad de mol
[PSI]	Libra fuerza por pulgada cuadrada
[g/m³]	Gramos por metro cúbico
[µm]	Micrometro
δ _v	Densidad del gas
[H/h]	Horas hombre

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1: Tipos de explosiones en función de la energía liberada.....25

Figura 1-2: Rango de inflamabilidad para propano 26

Figura 1-3: Detonaciones para diferentes hidrocarburos 28

Figura 1-4: Configuración de las explosiones de polvo.....30

Figura 1-5: Explosión vapor agua-fundido 32

Figura 1-6: Rango de explosividad en función de la distancia 35

Figura 1-7: Secuencia de propagación onda de choque sobre estructuras.....36

Figura 2-1: Diagrama simplificado calentamiento de aerosoles.....39

Figura 2-2: Algoritmo de cálculo metodología TNT equivalente 42

Figura 2-3: Diagrama simplificado calentamiento de aerosoles.....45

Figura 2-4: Gráfico para determinación de sobrepresión escalada 47

Figura 2-5: Algoritmo de cálculo metodología Multienergía 49

Figura 2-6: Gráfico para determinación de sobrepresión escalada 50

Figura 3-1: Distribución geométrica para cada recinto evaluado. 58

Figura 3-2: Configuración interior bodega almacenamiento aerosoles 60

Figura 4-1: Distribución de onda de choque en función de la distancia y parámetros umbrales .81

Figura 4-2: Panel para explosiones galvanizado.....86

Figura 4-3: Sistema de protección pasiva para racks.....89

Figura 4-4: Inundación total interior por espuma de alta expansión 90

Figura 4-5: Ubicación de las toberas generadores y patrón de llenado circular 90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1-1: Rango de inflamabilidad para diferentes hidrocarburos 27

Tabla 1-2: Concentración mínima explosiva para polvos.....29

Tabla 3-1: Proyectos seleccionados para aplicación metodológica 55

Tabla 3-2: Resumen características proyectos en evaluación 55

Tabla 3-3: Parámetros de tolerancia umbral para efectos mecánicos 56

Tabla 3-4: Identificación sustancia peligrosa aerosoles.....57

Tabla 3-5: Propiedades físicas y químicas propano 57

Tabla 3-6: Propiedades termodinámicas del propano 58

Tabla 3-7: Dimensiones y características de cada recinto identificado 59

Tabla 3-8: Dimensiones de cada rack de almacenamiento 59

Tabla 3-9: Distancia en función del límite umbral.....64

Tabla 3-10: Sobrepresión máxima en función del radio en cada bodega 64

Tabla 3-11: Volumen estimado para cada recinto en evaluación 66

Tabla 3-12: Distancia en función del límite umbral.....67

Tabla 3-13: Sobrepresión máxima en función del radio en cada bodega 67

Tabla 4-1: Cuadro comparativo distancia en función de límite umbral.....70

Tabla 4-2: Cuadro comparativo sobrepresión en función de la distancia objetivo. 71

Tabla 4-3: Análisis de sensibilidad bodega sustancias peligrosas P&G 76

Tabla 4-4: Análisis de sensibilidad modificación bodega sustancias peligrosas 77

Tabla 4-5: Análisis de sensibilidad planta Portland Noviciado 77

Tabla 4-6: Análisis de sensibilidad bodega sustancias peligrosas Ecolock 77

Tabla 4-7: Costo de inversión en UF por metro cuadrado recintos en evaluación 83

Tabla 4-8: Controles y medidas recomendadas para los recintos de almacenamiento de aerosoles
.....88

GLOSARIO

Accidentes tecnológicos: Incidente, falla o pérdida inesperada ocurrida con el uso de ciencias prácticas o mecánicas de la industria que deriven en un daño potencial a las personas, a las propiedades o al ambiente.

Análisis de consecuencias: Evaluación cuantitativa que pueden representar fenómenos peligrosos en los que intervienen sustancias peligrosas con el objetivo de estimar la naturaleza y magnitud del daño potencial.

Análisis de riesgo simple: Metodología asociada a la identificación de la secuencia de fallas que permiten la expresión de un accidente mayor, sin determinar la probabilidad de ocurrencia de los eventos.

Autorización sanitaria: Documento otorgado por la Autoridad Sanitaria de cada región que autoriza la realización de una actividad lucrativa en virtud del cumplimiento de las normas de higiene y seguridad establecidas en la legislación nacional.

Efectos mecánicos: Conjunto de lesiones temporales o permanentes sobre el cuerpo humano a consecuencia de la exposición directa o indirecta a ondas de presión.

Efectos térmicos: Conjunto de lesiones temporales o permanentes sobre el cuerpo humano a consecuencia de la exposición directa o indirecta a radiación térmica.

Efectos tóxicos: Conjunto de lesiones temporales o permanentes sobre el cuerpo humano a consecuencia de la exposición directa o indirecta a agentes o sustancias tóxicas.

Protección activa: Elementos, sistemas o dispositivos diseñados para la detección, supresión o control de liberaciones temporales o permanentes, activados por medios manuales o electrónicos

Protección pasiva: Conjunto de medidas diseñadas para el control, canalización y confinamiento de liberaciones temporales o permanentes, que no requieren activación manual o electrónica.

Sustancia peligrosa: Aquellas sustancias que puedan significar un riesgo para la salud, la seguridad o el bienestar de los seres humanos y animales, clasificadas según la NCh 382:Of.2017

Deflagración: Propagación de llama u onda de choque con una velocidad inferior a la velocidad del sonido (300 [m/s])

Detonación: Propagación de llama u onda de choque con una velocidad superior a la velocidad del sonido (300 [m/s])

1. Introducción

Durante los últimos 100 años la industria mundial ha evolucionado de manera positiva frente a los nuevos desafíos que involucra su coexistencia con un medio ambiente cada vez más frágil y una sociedad más empoderada, que demanda mayores estándares de seguridad y credibilidad. Sin embargo, la condición actual tuvo un pasado difícil, donde debió enfrentar múltiples hechos que derivaron en graves accidentes tecnológicos con impactos sociales y ambientales relevantes, aumentando la frecuencia en los eventos de gran impacto desde los 10 en el año 1950 hasta casi 300 durante el año 2000 (OECD, 2003).

Los accidentes actuales son de mayor frecuencia, pero de menor impacto que los registrados durante la segunda mitad del siglo XX, gracias al enfoque preventivo adoptado por las diferentes actividades productivas y el estudio de los fenómenos asociados a la expresión de eventos catastróficos. Ambas acciones han permitido reducir el número total de víctimas fatales, a causa de accidentes tecnológicos, pese al aumento registrado por su frecuencia a causa del crecimiento industrial. De la misma forma, se ha demostrado que la incidencia mundial de incidentes industriales tiene menores efectos sobre la población, en países desarrollados gracias a que disponen de rigurosas reglamentaciones para el manejo de sustancias peligrosas, a diferencia de países en vías de desarrollo con regulaciones más débiles, donde estos accidentes tienen un gran efecto sobre las personas y el medio ambiente (Mihailidou, Antoniadis, & Asael, 2012).

Uno de los aspectos claves para reducir el impacto de los accidentes tecnológicos sobre las personas y el medio ambiente, es el estudio detallado de los eventos iniciadores de fallas junto con los fenómenos físicos y químicos que estos generan. En este contexto, destacan los esfuerzos de instituciones como la Organización Holandesa de Investigación Científica Aplicada (*TNO*), quien en una serie de publicaciones ha descrito las características de los fenómenos asociados a los accidentes tecnológicos, su comportamiento, modelos de cálculo y predicción, con el objetivo de determinar cuantitativamente los posibles efectos que una determinada actividad industrial genere sobre las personas, el medio ambiente y otras instalaciones (TNO, 2005). Este documento es hoy una referencia internacionalmente válida para el cálculo y análisis de consecuencias para efectos térmicos, mecánicos y químicos.

En esta perspectiva, Chile también ha incorporado elementos de análisis con el objetivo de mejorar las condiciones de seguridad a nivel industrial, especialmente en el transporte, manipulación y almacenamiento de sustancias peligrosas.

Desde la perspectiva nacional, el incendio de la Bahía de San Vicente en el año 1993 y posteriormente el incendio de Mathiesen Molypac en Santiago el año 1995, constituyeron incidentes químicos y ambientales simbólicos a fines del siglo XX, que sumados a otras decisiones de estado, motivaron la creación de la Política Nacional de Seguridad Química en el año 2008 (Ministerio de Medio Ambiente, 2017). Este instrumento de planificación articuló una serie de disposiciones técnicas y administrativas tendientes a mejorar las condiciones de seguridad de las sustancias peligrosas en el país. Posteriormente en el año 2010 se publicó el Decreto N°78 del Ministerio de Salud “Reglamento de Almacenamiento de Sustancias Peligrosas” que incorpora el concepto de análisis de consecuencias como método de cálculo para la evaluación de efectos térmicos, mecánicos y tóxicos sobre las personas. A partir del año 2015 entró en vigencia el Decreto N°43 del Ministerio de Salud, que derogó el anterior Decreto N°78. Este nuevo cuerpo jurídico incorpora el concepto de análisis de riesgo simple por árbol de eventos y el Manual de Métodos de Análisis de Riesgos y Consecuencias, con las metodologías validadas por la autoridad sanitaria para dimensionar el riesgo químico de las sustancias peligrosas durante su etapa almacenamiento (Ministerio de Salud, 2016).

Actualmente, todas las instalaciones que almacenan sustancias peligrosas en el territorio nacional y que requieren autorización sanitaria, deben presentar un análisis de riesgo y consecuencias que dimensione los efectos derivados de los posibles accidentes tecnológicos al interior de las instalaciones industriales y su respectiva cadena de eventos iniciadores mediante un árbol de eventos simple, aplicando las metodologías definidas por el Ministerio de Salud.

En el caso de las bodegas de almacenamiento para aerosoles, es necesario presentar un análisis de consecuencias para efectos mecánicos, que dimensione la sobrepresión máxima estimada a partir de la cantidad declarada al interior del recinto.

El presente estudio identificó posibles desviaciones expresas por la metodología TNT equivalente (TNO, 2005) cuando es aplicada a bodegas de almacenamiento de aerosoles, estableciendo eventuales variables de interferencia y eventuales impactos sobre el diseño de las bodegas que actualmente son autorizadas por la autoridad sanitaria.

2. Objetivos

A continuación, se presentan los objetivos generales y específicos correspondientes al presente trabajo de titulación.

2.1.Objetivo general

Establecer las interferencias existentes en los modelos de análisis de consecuencias para efectos mecánicos, actualmente utilizados por el Ministerio de Salud para recintos de almacenamiento de aerosoles con gases propelentes inflamables, definidos como sustancias peligrosas clase de riesgo 2.1 “gases comprimidos inflamables”.

2.2.Objetivos específicos

- Determinar las variables críticas que afectan el cálculo de sobrepresión, para el almacenamiento de aerosoles en bodega.
- Estimar sus efectos sobre el diseño de estos recintos mediante el Análisis de los modelos de cálculo de consecuencias establecidos por el Ministerio de Salud.
- Proponer medidas de control pasivas y activas que contribuyan a reducir el riesgo de explosión al interior de bodegas, junto a su estimación económica.

3. Justificación

Desde el año 2010, las bodegas para el almacenamiento de aerosoles, clasificados como sustancia peligrosa clase de riesgo 2.1 “gases comprimidos inflamables” según la NCh 382:Of.2017, deben presentar un análisis de consecuencias para efectos mecánicos, que garantice la resistencia estructural del recinto y mitigue los posibles daños a personas, frente a un accidente tecnológico del tipo explosión.

Actualmente el análisis de consecuencias para efectos mecánicos utiliza la metodología del TNT equivalente para determinar la sobrepresión máxima en función de la distancia entre el centro de la explosión y el receptor. En este escenario, la empresa ATM Consultores, especializada en el manejo de sustancias peligrosas, ha realizado en los últimos 8 años, más de 25 análisis de consecuencias para bodegas de almacenamiento de aerosoles, detectando que la metodología señalada entrega valores extraordinariamente altos para el escenario de cálculo planteado y que no configura magnitudes coherentes con referencias especializadas consultadas (HSE, 2012).

Esta desviación tiene efectos directos sobre el diseño de los recintos para almacenamiento de aerosoles, ya que, al existir magnitudes de sobrepresión tan altas, se debe extremar la resistencia estructural de las bodegas, aumentando los costos de construcción y mantenimiento.

La aplicación de la metodología TNT equivalente sobre el sistema planteado, también sugiere que el fenómeno que se propone dimensionar, no se ajusta al comportamiento descrito para el tipo de explosión que podría desarrollar la liberación del agente propelente desde los aerosoles (NFPA, 2008). Esto tiene un impacto directo sobre las medidas de protección pasivas y activas dispuestas para este tipo de recintos, ya que actualmente solo contemplan una parte de la respuesta recomendada para tolerar una eventual explosión y posterior incendio de las bodegas para aerosoles, pudiendo esto generar una falsa sensación de seguridad para el material almacenado.

La selección del método de cálculo debe contemplar las ventajas y desventajas descritas en referencias internacionales de amplio uso industrial, que tienen por objetivo describir y cuantificar adecuadamente los diferentes tipos de explosiones. Lo anterior, dado que no todas ellas se estiman de la misma forma, sobre todo para efectos de diseño y prevención de riesgos.

El presente trabajo identificará el método de estimación de efectos mecánicos, más apropiado, recomendado por la literatura internacional e instituciones especializadas en análisis de consecuencias para accidentes tecnológicos (TNO, 2005). Posteriormente, determinará las variables críticas sobre la metodología utilizada por la autoridad nacional competente y su efecto en los análisis desarrollados por ATM Consultores a múltiples sectores productivos, durante los últimos 8 años.

La comparación de los modelos de cálculo y su ajuste a magnitudes consistentes al tipo de explosión esperada, para el almacenamiento en bodega de aerosoles, permitirá desarrollar diseños estructurales coherentes al riesgo efectivo evaluado. Esto tiene un impacto directo sobre los costos de construcción de los recintos señalados, evitando sobredimensionar la estructura base y su resistencia frente a la sobrepresión estimada.

La comprensión detallada del tipo de explosión tendrá un impacto directo sobre las medidas de control de ingeniería, pasivas y activas, ajustadas al fenómeno que mejor representa el riesgo de una liberación puntual instantánea del gas propelente utilizado en los envases de aerosoles, disminuyendo el riesgo de incendio y explosión frente a un escenario de falla catastrófica.

El desarrollo de este trabajo de título incluyó una serie de etapas previas, destinadas a formular una detallada recopilación bibliográfica junto al estudio de antecedentes técnicos propuestos internacionalmente para la estimación de sobrepresión, dentro de las cuales figuran los siguientes hitos relevantes:

- Revisión de antecedentes bibliográficos en idioma inglés, alemán y holandés.
- Traducción de los textos y capítulos de interés al idioma español.
- Estudio de experiencias internacionales para el cálculo de sobrepresión en bodegas.
- Comprensión detallada de los modelos numéricos efectivos, aplicables a explosiones de nubes de vapor.
- Desarrollo de los algoritmos de cálculo para aplicar el caso de almacenamiento en bodegas con diseño según las disposiciones reglamentarias del territorio nacional.

Estas actividades, junto a la redacción, cálculo y edición del presente documento consolidaron un total aproximado de 450 [H/h] durante el transcurso de 32 semanas corridas de trabajo. Dada la complejidad de los temas analizados, se proyecta un valor de 2,0 [Uf/h], lo que constituye una valorización de 900 [Uf].

4. Alcance

El análisis de consecuencias para efectos mecánicos será aplicado en bodegas exclusivas para sustancias peligrosas inflamables, que almacenan aerosoles, clasificados como clase 2.1 “gases comprimidos inflamables”, de acuerdo a la NCh 382:Of.2017, identificadas en el archivo de ATM Consultores & Ingeniería durante los últimos 8 años y que hayan requerido de una tramitación ambiental en el Servicio de Evaluación Ambiental, conforme a lo dispuesto en el artículo 3, letra ñ.3 del Decreto N°40 “Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental”, 2012/MMA.

El principal hito corresponde al cálculo de sobrepresión sobre un mismo recinto de almacenamiento, con cantidades y superficie conocidas, utilizando dos metodologías diferentes de estimación de efectos mecánicos (TNT equivalente y Multienergía). La evaluación a distancias inferiores a 50 [m] supone una sobrepresión muy por sobre lo esperado para el método TNT equivalente. La verificación de esta hipótesis permitirá evaluar la brecha existente entre ambas metodologías y si los resultados son consistentes con la magnitud del fenómeno descrito en la bibliografía consultada (NFPA, 2008).

La estimación de efectos mecánicos solo se limita al fenómeno de explosión por nube de vapor, descartando otro tipo de escenarios como las explosiones por reacción química, explosivos de fase condensada u ruptura de envases.

5. Metodología

El análisis de consecuencias para efectos mecánicos aplicado a las bodegas de aerosoles será abordado por dos metodologías de cálculo que determinan la sobrepresión máxima esperada, en función de una distancia objetivo.

Previamente, serán analizados los diferentes tipos de explosiones categorizadas por la literatura internacional (NFPA, 2008), para determinar cuál de ellas se ajusta mejor al comportamiento esperado de una liberación desde envases de aerosol al interior de un recinto confinado.

La metodología propuesta considera la siguiente secuencia de trabajo para abordar los objetivos señalados en el punto II y que corresponden al desarrollo de los capítulos que se presentan más adelante.

- **Determinar las variables críticas que afectan el cálculo de sobrepresión:** Comprende una revisión detallada de los diferentes tipos de explosiones, su comportamiento, las condiciones necesarias para formar deflagraciones y detonaciones, la magnitud esperada de la sobrepresión y las principales variables que afectan una propagación laminar o turbulenta. De la misma forma, se analizará el efecto del rango de explosividad del propano y las condiciones de concentración que se requieren para formar una atmósfera explosiva en un recinto confinado. A partir del estudio sobre el tipo de explosiones, serán analizados los diferentes modelos de cálculo para sobrepresión, en referencia a lo publicado por *TNO* en su documento CPR 14E (TNO, 2005). En este sentido se consideran aquellas metodologías basadas en estallido de carga por TNT y estallido de carga por relación combustible-aire.
- **Estimar los efectos sobre el diseño de los recintos de almacenamiento:** En base a los datos disponibles en ATM Consultores & Ingeniería, se recopilarán las características de los recintos donde serán aplicados los métodos de cálculo presentados en la normativa legal aplicable y los métodos recomendados según el tipo de explosión que representan las liberaciones de aerosoles. Esto incluye definir la superficie, el volumen, el sistema de ventilación propuesto, la masa de aerosoles declarada y el formato de almacenamiento. En este punto serán analizados algunos aspectos estadísticos de la realidad nacional, en virtud de los proyectos disponibles en la base de datos del SEA. De acuerdo a los puntos desarrollados en los capítulos 2 y 3, serán aplicadas las metodologías en base a carga de TNT y relación aire-combustible, para los escenarios detallados en el capítulo 3.

- **Proponer medidas de control para reducir el riesgo de explosión:** En virtud de los resultados anteriores se aplicarán métodos gráficos y estadísticos para representar la magnitud de la sobrepresión estimada en cada caso, para luego comparar estos datos con la evaluación de riesgo para almacenamiento de aerosoles en bodegas, realizada por el *Health and Safety Laboratory* de Reino Unido (HSE, 2012). En función de estos valores, se evaluarán las medidas de control pasivas y activas contempladas en cada recinto de almacenamiento. Para la metodología TNT equivalente se aplicará un análisis de sensibilidad que determine cuál de las variables utilizadas representa una mayor incidencia sobre la magnitud de la sobrepresión calculada.

CAPÍTULO 1.0 FENOMENOLOGÍA DE LAS EXPLOSIONES

Una explosión corresponde al resultado de una expansión violenta y repentina de energía que causa un gradiente de alta presión o temperatura en el punto de origen y que luego se propaga a través de un determinado medio (aire o agua). La cantidad de energía liberada determina la fuerza de la onda de choque, que representa la diferencia de presión o sobrepresión sobre un objetivo a una distancia dada en referencia al punto de origen (NFPA, 2008).

El *peak* de sobrepresión en el sitio de explosión depende de la cantidad de energía liberada por unidad de volumen. Este parámetro, junto al tiempo de duración asociado a la liberación de energía, permiten caracterizar los diferentes tipos de explosiones (NFPA, 2008).

La figura 1-1 muestra los diferentes tipos de explosiones, expresadas en unidades de *peak* de presión y duración de la liberación de energía. Las del tipo nuclear, destacan sobre el resto, considerando la gran cantidad de energía por unidad de volumen que liberan, correspondiente a millones de [PSI].

Los explosivos de fase condensada corresponden a materiales de uso militar e industrial, usualmente divididos en dos categorías: Explosivos de alto poder y explosivos de bajo poder. Los primeros tienden a detonar, lo que significa una propagación de la onda de choque a una velocidad superior a la velocidad del sonido (300 [m/s]), las que pueden generar un *peak* de sobrepresión en el rango entre 10^4 a 10^6 [psi]. Los explosivos de bajo poder tienden a deflagrar, esto es, una velocidad de propagación inferior a la velocidad del sonido (NFPA, 2008). Este tipo de explosivos, normalmente son utilizados para explotación minera, construcción de túneles y demoliciones.

Las energías liberadas por explosivos de fase condensada (utilizados en aplicaciones industriales y explosivos militares), son expresadas en términos de peso equivalente en TNT. Un kilogramo de TNT tiene una energía explosiva de $4,2 \times 10^6$ Joules, por cuanto un kilotón de TNT equivale a $4,2 \times 10^6$ [kJ].

Respecto a las explosiones de gas, estas pueden ser detonaciones o deflagraciones, dependiendo de si la velocidad de llama es más alta que la velocidad del sonido. El *peak* de sobrepresión generado en las detonaciones es al menos dos veces más intenso que en las deflagraciones y la escala de tiempo es al menos un orden de magnitud más pequeña, tal como lo señala la figura 1-1.

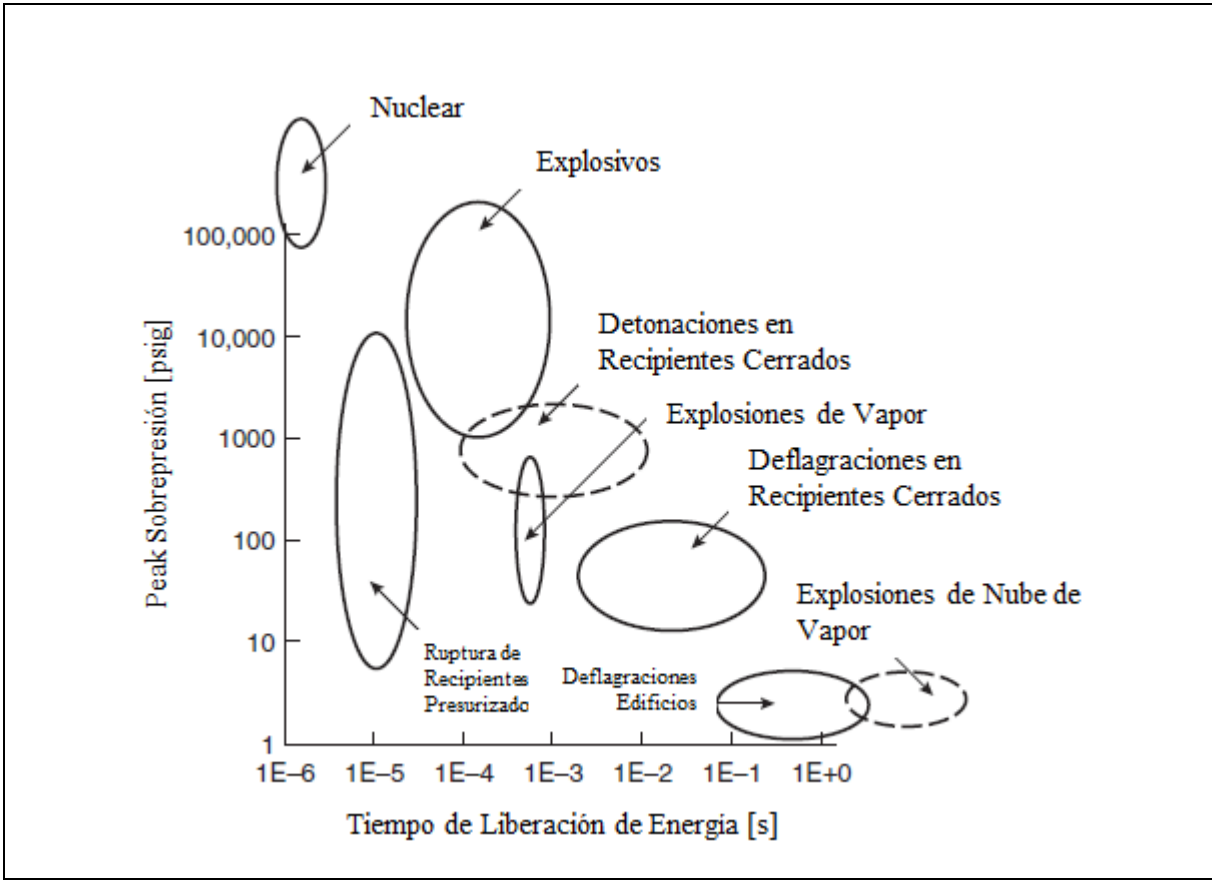


Figura 1-1: Tipos de explosiones en función de la energía liberada
Fuente: Manual de Protección contra Incendios NFPA, Edición 20, 2008

Las explosiones de nubes de vapor se refieren a deflagraciones de grandes nubes de gas o vapor inflamable en un área altamente obstruida o parcialmente confinada. Los peaks de sobrepresión asociados a este fenómeno tienen el mismo orden de magnitud que aquellas catalogadas como deflagraciones de edificios, pero la cantidad de energía liberada es usualmente mayor, dado el tamaño y superficie que alcanzan las nubes de vapor.

La clasificación de explosiones, en virtud de su fuente de origen, energía liberada y comportamiento, existen 6 tipologías, conforme a la descripción realizada por la Asociación Nacional de Protección Contra Incendios de Estados Unidos (NFPA) y su Manual de Protección Contra Incendios (NFPA, 2008): Deflagraciones de gas y vapor inflamable, detonaciones de gas, deflagraciones por polvo combustible, explosiones por reacción química, explosiones de vapor y explosiones de nubes de vapor. A continuación, se describen cada una de ellas:

1.1 Deflagraciones de gas y vapor inflamable

Se entiende por deflagración a la propagación de llama subsónica de una mezcla gas-aire, tomando como referencia el punto de origen de la ignición. El concepto mezcla gas-aire se refiere a la existencia de una relación específica para cada gas inflamable respecto a su concentración en el aire. Esta mezcla iniciará un proceso de combustión (ignición) solo si la concentración se encuentra dentro de límites definidos, conocidos como límite inferior (LEL) y superior (UEL) de inflamabilidad (o explosividad), expresados en tanto por ciento sobre el volumen de mezcla gas-aire. La figura 1-2 representa la composición de esta condición límite para el propano, junto a las zonas que expresan una mezcla pobre (menos gas y más aire) y una mezcla rica (más combustible y menos aire).



Figura 1-2: Rango de inflamabilidad para propano
Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que los rangos de inflamabilidad son propios de cada sustancia en virtud de análisis experimentales. La tabla 1-1 muestra las distintas composiciones de rangos de inflamabilidad para diferentes gases derivados de hidrocarburos, utilizados frecuentemente en la industria (Drysdale, 2009).

Tabla 1-1: Rango de inflamabilidad para diferentes hidrocarburos

Gas Inflamable	LEL % Vol	UEL % Vol
Hidrógeno	4,0	75,0
Metano	5,0	74,0
Etano	3,0	12,4
Propano	2,1	9,5
n-Butano	1,8	2,7
n-Pentano	1,4	7,8
n-Hexano	1,2	7,4

Fuente: (Zebetakis, 1965)

En relación con las diferencias en el rango de inflamabilidad expresadas en la tabla 1-1, es posible afirmar que existe una relación entre esta propiedad y la condición de riesgo que deriva la formación de atmósferas explosivas, según el tipo de sustancia. Lo anterior, dado que una mezcla de gas-aire que presente un rango más amplio de inflamabilidad, tendrá una mayor probabilidad de desarrollar un proceso de combustión (explosión). En este sentido, destaca el hidrógeno y el metano, por sobre otros derivados de hidrocarburos.

La relación específica entre las condiciones de confinamiento de la mezcla gas-aire, la cantidad e intensidad de la fuente de ignición y la velocidad de combustión, determinarán el desarrollo de un escenario de incendio (inflamación), explosión o ambos.

Este tipo de explosiones son analizadas bajo parámetros experimentales para determinar su sobrepresión máxima, en términos de tasa de equivalencia, definido como la fracción de aire-combustible presentes, dividido por la fracción estequiométrica de aire-combustible. El análisis considera condiciones un sistema ideal de medición, sin intercambio de calor (sistema adiabático) y a volumen constante. Bajo estas condiciones, la sobrepresión máxima esperada para el propano es de 9,5 [atm] para una presión inicial de 1 [atm] (NFPA, 2008).

1.2 Detonaciones de gas

Una detonación es una explosión donde la propagación de la llama se desarrolla a velocidades supersónicas. En contraste con el fenómeno explicado en el punto 1.1, el aumento de presión durante la detonación es altamente uniforme y ocurre virtualmente en forma instantánea, lo que deriva en una rápida propagación de la onda de choque.

Las características de este fenómeno tienen un impacto en los métodos y medidas para la evaluación de resistencia sobre las estructuras que resguardan procesos o disposición de sustancias con este potencial, los cuales son expresados principalmente en los *peaks* de sobrepresión y su duración, respecto a las características del punto de origen. Las diferencias en las cargas de presión durante una deflagración o detonación producen modos de falla característicamente diferenciados sobre las estructuras o equipos.

La mayoría de las explosiones son catalogadas como deflagraciones; sin embargo, las detonaciones pueden ocurrir en algunas mezclas de gas inflamable siempre que existan fuentes de ignición extraordinariamente robustas, una geometría altamente elongada u obstruida, o bien un excepcional nivel de turbulencia que facilita la aceleración de la llama.

Desde el punto de vista del emplazamiento de la mezcla gas-aire, las detonaciones tienen una probabilidad de ocurrencia mucho mayor en extensos sistemas de tuberías que en recintos cerrados como edificaciones o estanques de procesos.

Respecto a las sobrepresiones máximas, la figura 1-3 muestra diferentes estimaciones para hidrocarburos en términos de porcentaje en volumen de combustible y la presión de detonación expresada en [bar]

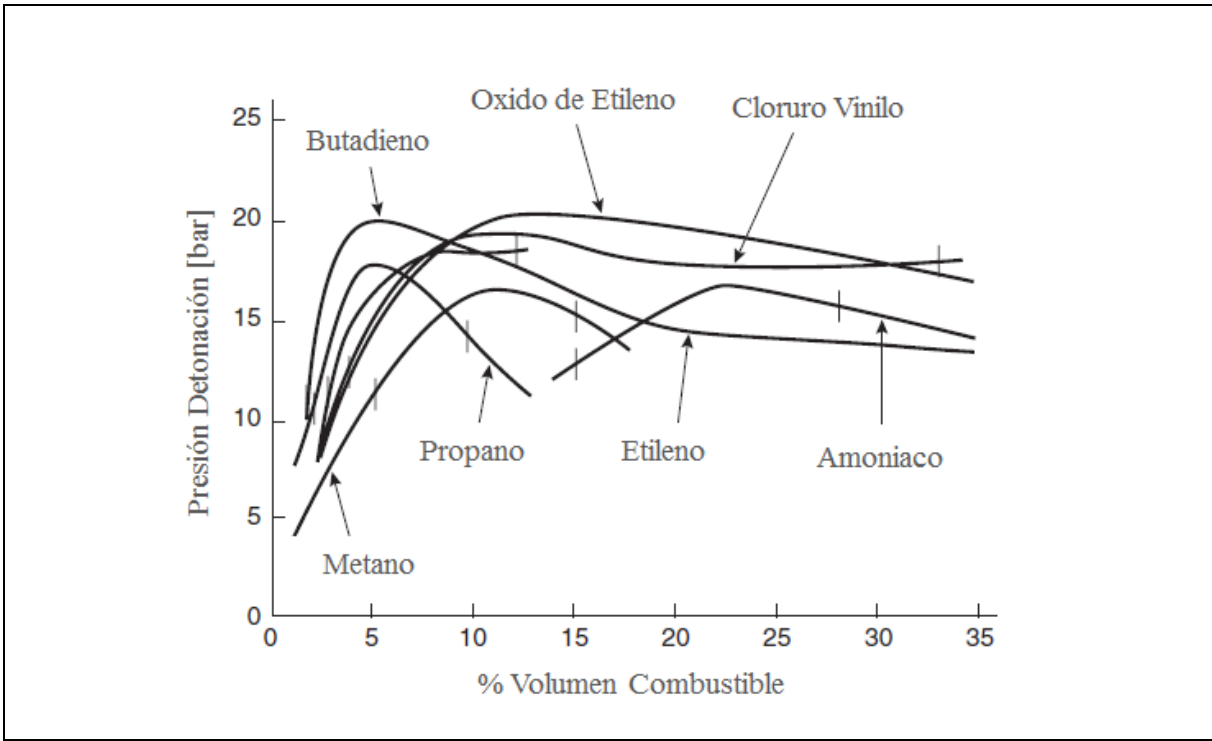


Figura 1-3: Detonaciones para diferentes hidrocarburos
Fuente: (NFPA, 2008)

1.3 Deflagraciones por polvo combustible

La formación de nubes de polvo combustible en un recinto cerrado puede producir deflagraciones en presencia de una fuente de ignición, siempre que la concentración de polvo sea mayor a la Mínima Concentración Explosiva o MEC por sus siglas en inglés. Esta propiedad depende del tamaño de la partícula de polvo y su composición.

Los límites de inferiores de explosividad para polvos de mayor frecuencia se ubican en un rango entre 30 a 60 [g/m³]. La tabla 1-2 muestra algunos límites de explosividad para polvos respecto del tamaño medio de partícula.

La mayoría de los daños y efectos destructivos asociados a este fenómeno ocurren como resultado de explosiones secundarias, causadas por películas de polvo ubicadas en el piso, equipos u otras estructuras, dispersadas inicialmente por la onda de choque de la explosión primaria y que posteriormente inician un proceso de combustión. Este proceso es particularmente destructivo cuando ocurre en espacios confinados o bien obstruidos. La figura 1-4 representa un esquema respecto a las explosiones primarias y secundarias.

Tabla 1-2: Concentración mínima explosiva para polvos

Material	Tamaño medio de partícula [μm]	Concentración explosiva mínima [g/m³]
Carbón activado	18	60
Aluminio	<10	60
Carbón bituminoso	4	60
Fructosa	200	60
Polvo de papel	54	30
Azúcar	10	60
Zinc	<10	250

Fuente: (NFPA, 2008)

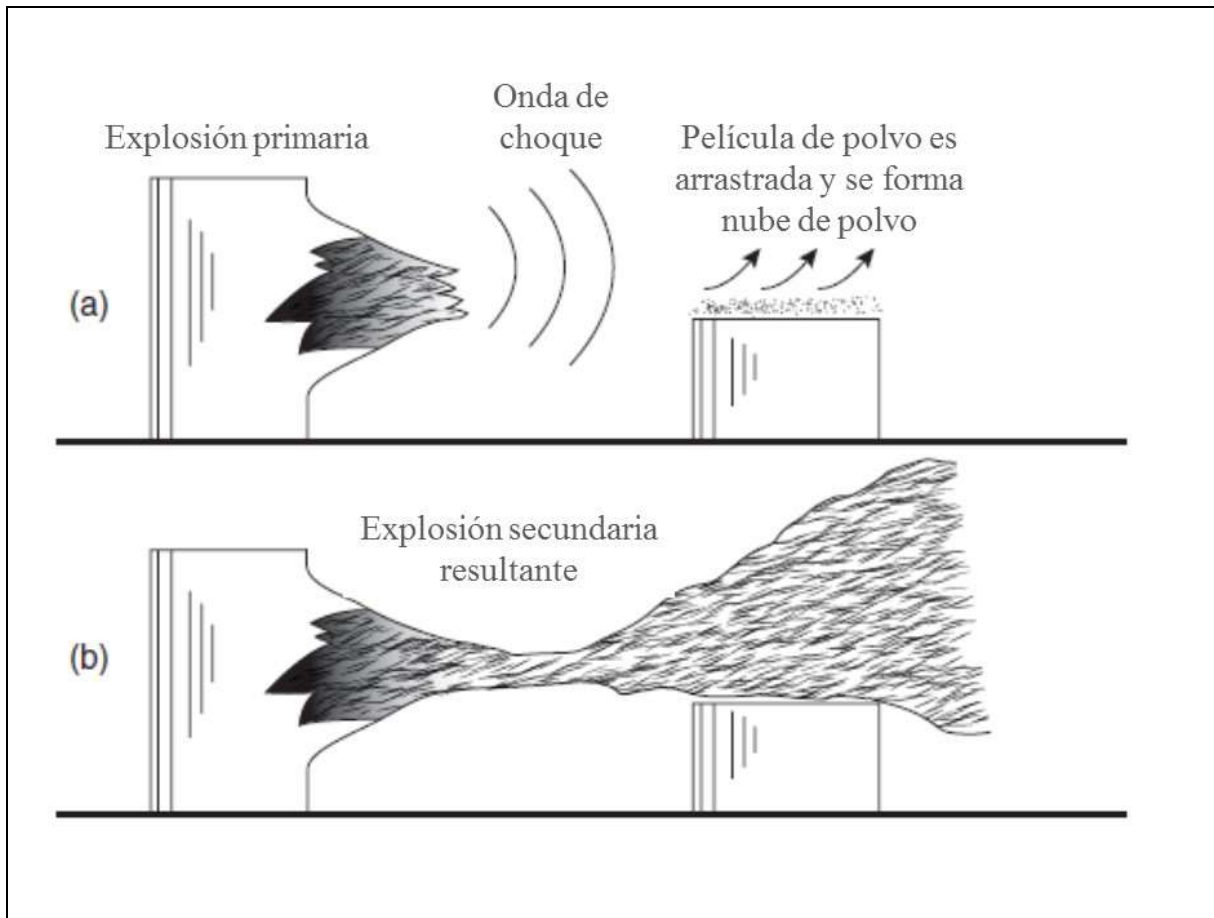


Figura 1-4: Configuración de las explosiones de polvo
Fuente: (NFPA, 2008)

El fenómeno descrito en la figura 1-4 tiene la capacidad de dispersar material combustible (polvo en suspensión), cubriendo todo el volumen del recinto, lo que facilita la propagación del incendio resultante de la explosión primaria. Lo anterior, eleva la temperatura de la estructura soportante del recinto y puede derivar en un colapso parcial o total, provocando nuevos espacios confinados y por consiguiente nuevas explosiones (efecto dominó).

1.4 Explosiones por reacción química

Las reacciones químicas no controladas pueden provocar explosiones en dos formas; la primera, asociada a la generación de gases que pueden presurizar recipientes, los cuales no están equipados con sistemas de venteo o liberación de sobrepresión. La segunda, vinculada con reacciones exotérmicas, los que generan suficiente calor para incrementar rápidamente la presión de los gases y vapores existentes en el recipiente.

Existen algunos tipos de reacciones químicas genéricas que pueden ocurrir a mayor velocidad que las reacciones de combustión de hidrocarburos, a elevadas temperaturas y derivar en la producción de múltiples productos gaseosos. Estas reacciones en su mayoría autocatalíticas incluyen descomposición y polimerización de compuestos inestables, oxido-reducción rápida, nitraciones, diazotización e hidratación de compuestos reactivos con agua.

El diseño de controles de ingeniería para abordar este tipo de reacciones requiere de una estimación de los efectos potenciales, propiedades termodinámicas, tasas de intercambio de calor esperado y la posible generación de subproductos. Una práctica habitual sobre estos fenómenos, corresponde a la experimentación a escala para determinar el comportamiento de la reacción bajo condiciones ideales de control, lo que permite verificar las condiciones de borde del sistema y proponer medidas correctivas específicas para cada condición de operación.

Cabe destacar que el nuevo Manual de Métodos de Análisis de Riesgos y Consecuencias, edición 2016 del Ministerio de Salud, incluye en su capítulo 3.4.2 una metodología para dimensionar explosiones químicas en función del “Método de Brode” que establece el cálculo de sobrepresión máxima a partir de un balance de energía (Brode, 1959).

1.5 Explosiones por material fundido

Una explosión por material fundido es un fenómeno físico causado por una rápida vaporización del agua en contacto directo con una superficie o segundo líquido a una temperatura mayor a la de su punto de ebullición. Este fenómeno se produce principalmente en procesos de fundición de metales, donde el líquido en contacto forma una interacción agua-material fundido, lo que deriva en una violenta explosión de vapor.

En términos prácticos, estas explosiones requieren de una etapa de premezclado de los líquidos, gatillada por el colapso de la película de vapor y una rápida propagación hacia la zona de vapor subsecuente. La figura 1-5 muestra la película de vapor siendo penetrada por un material fundido, lo que gatilla el colapso de la película externa, para luego continuar su propagación hasta la fragmentación total de la gota. Posteriormente los fragmentos son propulsados hacia el agua circundante hasta vaporizar explosivamente el agua sobre una región en expansión, lo que finalmente produce una onda de choque. La sobrepresión máxima estimada para este fenómeno tiene un orden de magnitud entre 2 a 70 [bar] con un tiempo en el orden de los milisegundos.

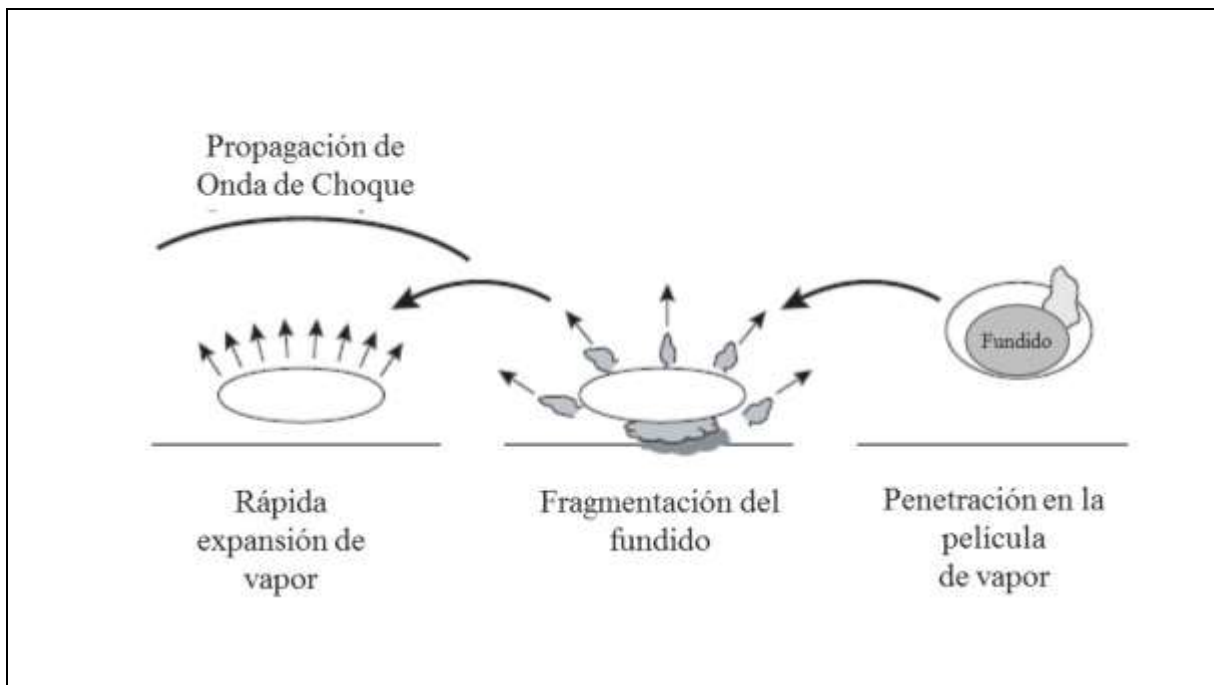


Figura 1-5: Explosión vapor agua-fundido
Fuente: (NFPA, 2008)

1.6 Explosiones de nubes de vapor

Una explosión por nube de vapor o VCE por sus siglas en inglés, es un fenómeno producido con posterioridad a la liberación de una gran cantidad de gas o vapor inflamable desde un estanque de almacenamiento, estanque de transporte o tubería, el cual entra en combustión en un área abierta con condiciones que favorecen una rápida velocidad de llama y por consiguiente un aumento de la presión.

La literatura de referencia (TNO, 2005) establece 4 restricciones para desencadenar una explosión por nube de vapor con capacidad para producir daños:

- i. El material liberado debe ser inflamable en condiciones adecuadas de presión y temperatura. Ejemplos de estas sustancias, corresponden a gases licuados bajo presión (propano, butano), líquidos inflamables ordinarios particularmente a altas temperaturas y/o presurizados (ciclohexano) y/o gases inflamables no licuados (metano, etano, acetileno).
- ii. Una nube debe formarse previamente a la ignición (fase de dispersión). Podría una ignición suceder de manera instantánea a la liberación, provocando una llamarada, que causará un relativo daño por radiación térmica (incendio). Sin embargo, un estallido con efectos sobre su entorno inmediato no ocurrirá, la nube requerirá de tiempo para formarse, cubrir un área determinada y posteriormente iniciar una ignición. Solo así la onda de choque se propagará desde el centro de la nube para provocar daños significativos sobre una amplia superficie.
- iii. Una parte de la nube debe estar dentro del rango de inflamabilidad. Generalmente una nube está compuesta por 3 regiones; una mezcla rica cercano al punto de liberación, una mezcla pobre en el borde o límite distal de la nube y una región entre ambas que configura una mezcla ideal, dentro del rango de inflamabilidad. El porcentaje de vapor en cada región de la nube varía dependiendo de factores como: Tipo y cantidad de material liberado, presión de liberación, tamaño de la apertura de la liberación, grado de confinamiento, viento, humedad y otros efectos ambientales.
- iv. Los efectos del estallido producidos por la explosión de nube de vapor están determinados por la velocidad de propagación de llama. A medida que esta es más alta, la sobrepresión derivada será también mas mayor, lo incrementará los efectos dañinos del estallido. Esto implica que el modo de propagación de la llama es muy relevante, para efectos de estimación de consecuencias y evaluación del daño asociado, comportándose generalmente como una deflagración y en casos muy especiales como una detonación (condiciones extremas).

La velocidad de llama requerida para generar sobrepresiones potencialmente dañinas en un área virtualmente confinada está en el orden de 100 [m/s]. A medida que el nivel de confinamiento aumenta, la velocidad de llama requerida disminuye.

Para determinar el nivel de daño asociado a la sobrepresión máxima de la explosión por nube de vapor, los modelos de cálculo se enfocan en el estudio del comportamiento en el centro del estallido, gobernado principalmente por la velocidad de llama y su nivel de confinamiento. En esta dirección, el método de Baker-Strehlow publicado en 1983, establece una correlación numérica que ha sido comprobada bajo criterios de simulación computarizada, donde se verifica que la presión generada al interior de la nube (perímetro interno), varía en función de la velocidad de llama. Por otra parte, el perímetro externo de la nube de vapor es representado por la onda de choque, la cual es analizada en función de gráficas de curvas de presión de choque versus la distancia de energía escalada. Finalmente, la sobrepresión se estima a partir de la cantidad de vapor inflamable liberado y su rendimiento, asociado a la fracción de energía teórica en combustión capaz de contribuir en la onda de choque. Estos parámetros de cálculo y modelación han sido verificados experimentalmente para sustancias químicas específicas y condiciones especiales de confinamiento.

Las explosiones de nubes de vapor han demostrado ser las de mayor frecuencia de ocurrencia a nivel industrial con la capacidad de generar efectos dañinos sobre las personas, el medio ambiente y otras instalaciones.

El estudio asociado al comportamiento de las explosiones, su origen, transporte, propagación y alcance, tiene una influencia importante sobre el modelo de cálculo para la estimación de sobrepresión. En este contexto, no es posible homologar un criterio específico para todas las tipologías descritas anteriormente, dado que las variables que influyen en cada fenómeno son diferentes. De la misma forma, la descripción señalada establece la necesidad de condiciones de borde esenciales para el desarrollo de fenómenos dañinos y que influyen en la selección del método adecuado para el dimensionamiento de los posibles efectos mecánicos.

La restricción iii (punto 1.6, página 30), establece que necesariamente el estallido se producirá en la interfase de la nube, correspondiente al rango de inflamabilidad y que de acuerdo con el proceso de transferencia de materia formará la mezcla rica en la zona más próxima al punto de liberación. De esta idea se extrapola que el límite superior de inflamabilidad/explosividad (UEL) estará más cerca del punto de origen de la liberación, lo que configura la condición de masa más alta con potencial de estallido y consecuentemente con mayor poder destructivo.

La figura 1-6 representa un esquema simplificado del rango de explosividad en función de la distancia desde el centro de la liberación (X_0), donde la posición X_1 corresponde al punto más próximo a la fuga desde un estanque y que presenta una mayor concentración en términos de porcentaje (C_{c2}). El parámetro umbral que gráfica esta condición de borde corresponde al límite superior de explosividad (UEL).

De la misma forma, la posición X_2 corresponde al punto más distal o cercano al borde de la nube y que representa una menor concentración en términos de porcentaje (C_{c1}). El parámetro umbral que expresa esta condición de borde corresponde al límite inferior de explosividad (LEL).

El rango de explosividad o interfase queda representado por la concentración C_{c1} y C_{c2} en función de la distancia desde el punto de fuga, expresado por X_1 y X_2 . Solo en esta zona será posible el desarrollo de una explosión por nube de vapor.

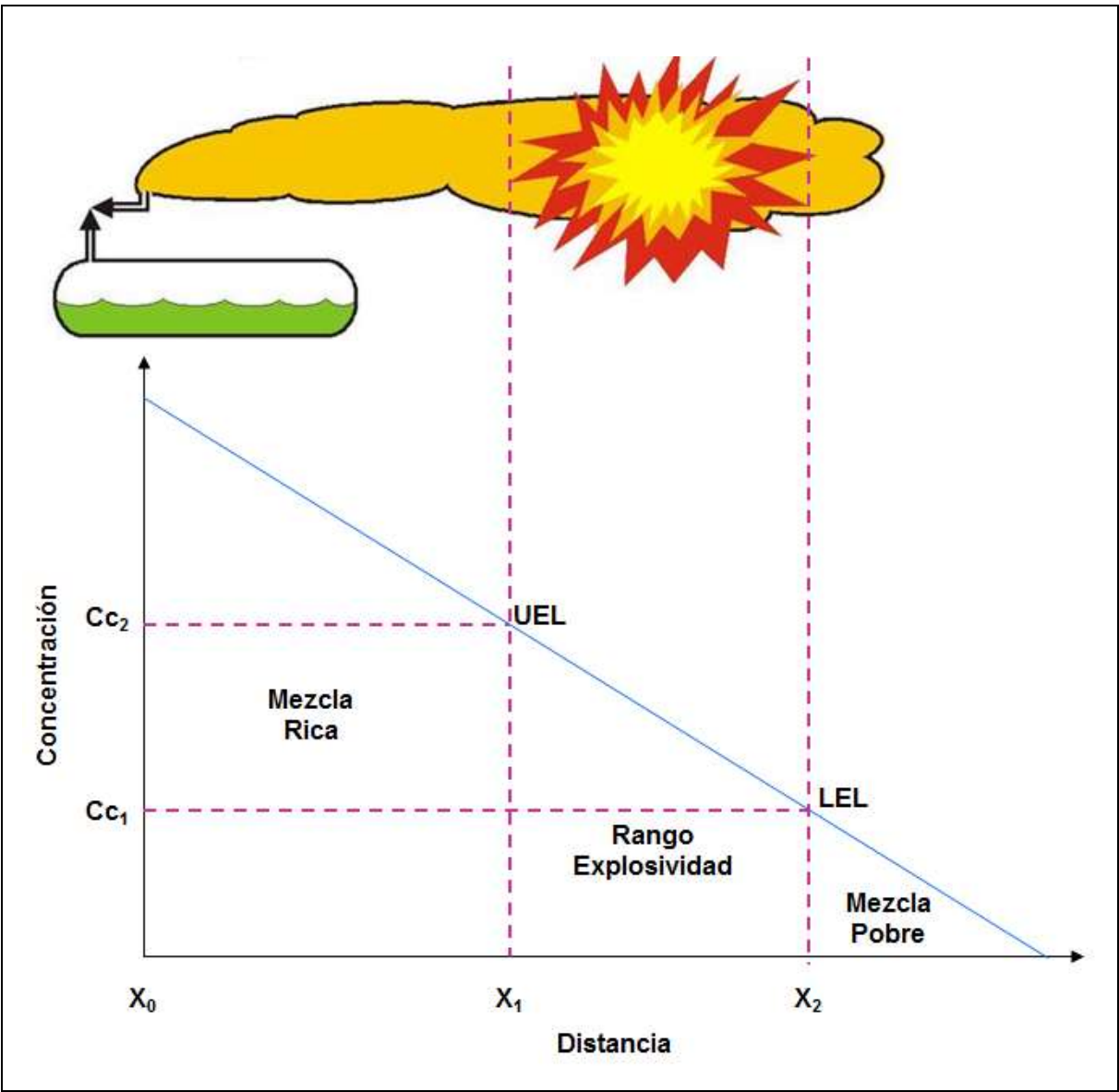


Figura 1-6: Rango de explosividad en función de la distancia
Fuente: Elaboración propia

La figura 1-7 representa un modelo simplificado de distribución de fuerzas a consecuencia de una explosión exterior, sobre un edificio, a medida que la onda de choque aumenta su velocidad y se propaga por el aire. Este modelo se ajusta al escenario potencial de estallido en una bodega de almacenamiento con capacidad de externalizar sus efectos mecánicos sobre otras instalaciones. De la misma forma se representa un estallido del tipo semiesférico, asumiendo que este se produce a nivel de suelo (piso de la bodega). Debido al almacenamiento en racks de las bodegas, es posible que la explosión se produzca en niveles superiores, configurando una explosión de tipo esférica con efectos mecánicos distribuidos en múltiples direcciones.

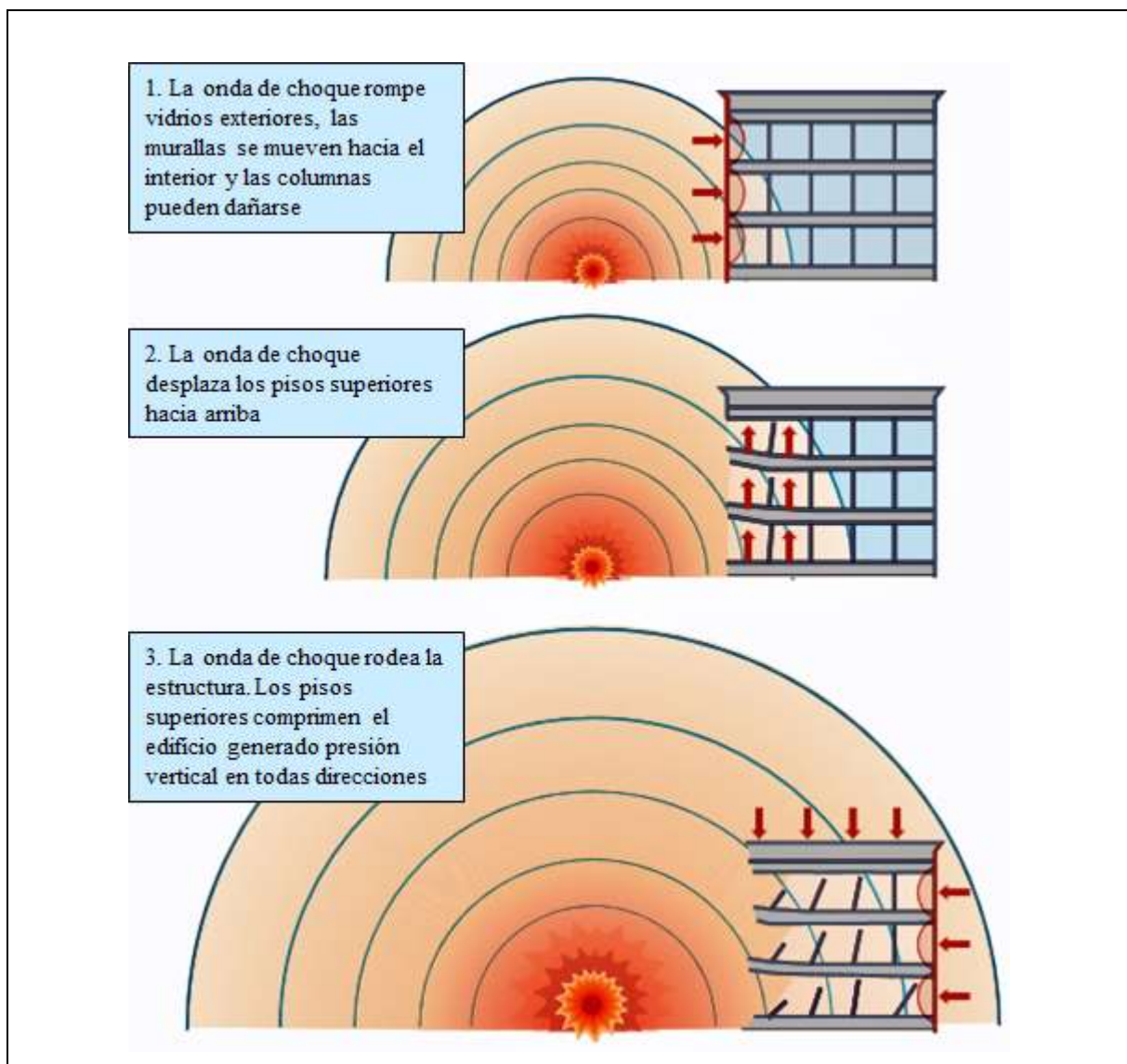


Figura 1-7: Secuencia de propagación onda de choque sobre estructuras

Fuente: (FEMA, 2003)

CAPÍTULO 2.0 CARACTERÍSTICAS DE LOS MODELOS DE SOBREPRESIÓN

Tal como se describió en el capítulo anterior, existen diferentes tipos de explosiones, en función de la fuente de origen, velocidad de la onda de choque y condiciones especiales del medio de propagación. Todos estos elementos permiten establecer que no es posible homologar un método en particular que describa en forma correcta las diferentes tipologías de movimiento, por lo que el método de cálculo de sobrepresión debe ser específico para cada fenómeno.

Respecto al almacenamiento de aerosoles en bodegas, se utilizará la definición propuesta por (Atkinson, 2007) y referenciada por el Laboratorio de Seguridad y Salud Ocupacional del Reino Unido, donde se establece que las eventuales explosiones al interior de estos recintos, tienen la capacidad de desarrollar el fenómeno caracterizado como explosión de nube vapor, descrita en el punto 1.6.

La formación de explosiones por nubes de vapor quedará condicionada a un posible incendio al interior de la bodega, no relacionada inicialmente a los aerosoles, que consecuentemente genere una capa de aire caliente en la parte superior del recinto, próxima al techo. Con el consecuente aumento de la temperatura, los aerosoles aumentarán la presión interna de los envases hasta estallar y liberar su contenido inflamable (principalmente propano como gas propelente). Posteriormente, el propano se ubicará en zonas bajas del recinto, debido a que su densidad relativa es menor que 1 ($\delta_v < 1$). Lo anterior puede derivar en la formación de una gran nube de vapor inflamable que daría lugar a una VCE cuando esta encuentre una fuente de ignición. La figura 2.1 representa un esquema simplificado de la capa caliente superior en contacto con aerosoles almacenados.

El fenómeno desplegado en la figura 2.1 sugiere además que los líquidos y gases inflamables pueden ser liberados fuera del área de incendio, permitiendo la propagación de fuentes de combustible y aumentar la superficie total de ignición. De la misma forma, los líquidos pueden dispersarse sobre otros elementos combustibles como cajas, envases y plástico a consecuencia del calentamiento de aerosoles en la parte superior.

Finalmente, la mezcla de aire caliente y gases inflamables liberados fluyen libremente al interior del recinto, formando una nube de vapor explosiva (VCE).

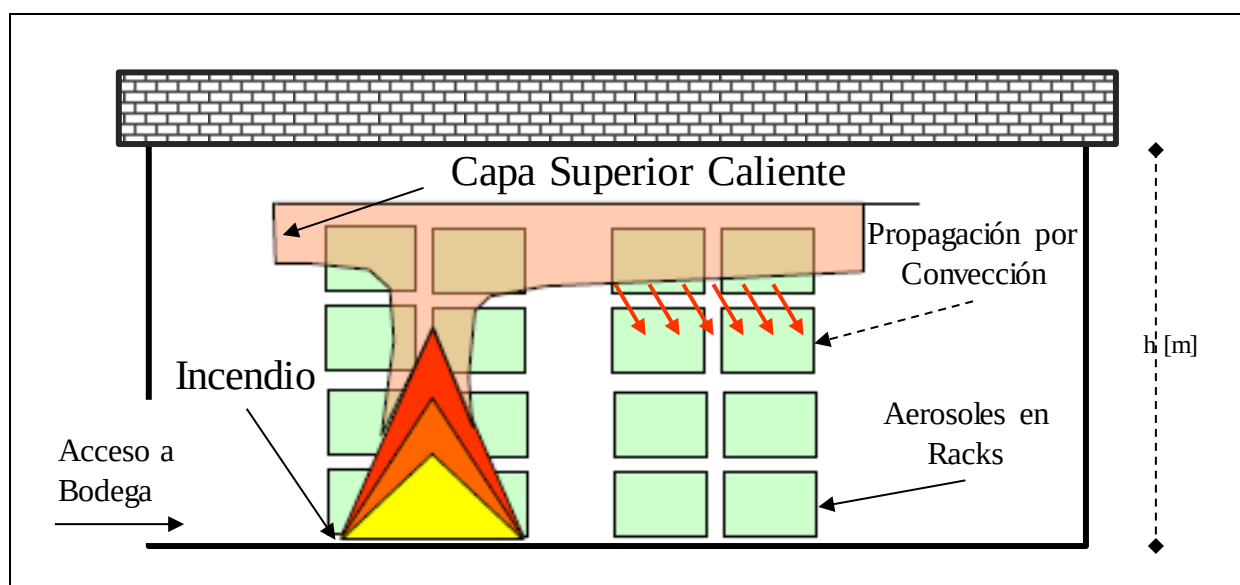


Figura 2-1: Diagrama simplificado calentamiento de aerosoles

Fuente: Elaboración propia

En referencia al cálculo de sobrepresión y sus efectos mecánicos, existen dos grupos de modelos para describir las características de un estallido. El primero de ellos cuantifica la fuente como una cantidad equivalente de explosivos de alto poder, generalmente el TNT, con el objetivo de comparar una determinada explosión con las características conocidas y estudiadas del TNT. Históricamente este método ha sido ampliamente usado y aceptado por múltiples organizaciones. No obstante, durante la última década, el estudio de las explosiones por nube de vapor ha estado sujeto a un intenso debate internacional frente a la dificultad de describir algunas explosiones de gran magnitud, con los métodos de cálculo vigentes. En este escenario, se desarrolla el segundo método basado en la carga de estallido aire-combustible, denominado Multi-Energía y que analiza el volumen total de combustible disponible para la explosión

El modelo Multi-Energía, hace referencia a la carga de estallido aire combustible, que describe de mejor forma el fenómeno de las VCE y resultados más cercanos a la realidad en términos de sobrepresión y la distancia.

Cabe destacar que el modelo TNT equivalente corresponde a la metodología establecida en el Manual de Métodos de Análisis de Riesgo y Consecuencias del Ministerio de Salud, como referencia de cálculo para la estimación de efectos térmicos en el territorio nacional.

Las metodologías de cálculo analizadas corresponden a:

- Método basado en la carga de estallido equivalente en TNT
- Método basado en la carga de estallido aire-combustible

2.1 Método basado en la carga de estallido equivalente en TNT

Este método fue desarrollado entre los años 1940 y 1960 con objetivos militares, para determinar el potencial de destrucción de diferentes explosivos en desarrollo. Se estableció una relación entre el daño potencial y explosivos de alto poder que permitió formular una equivalencia entre una explosión accidental y la carga de TNT.

Frente a la necesidad de cuantificar el daño potencial del poder explosivo en combustibles, el modelo fue ampliamente utilizado para la estimación de grandes explosiones de nubes de vapor, incluso para predecir los efectos potenciales de un estallido asociado a una carga puntual de sustancia inflamable. Lo anterior, resulta en una comparación simple de la energía de combustión disponible en una nube de vapor, respecto a una carga equivalente de TNT, según se muestra en la ecuación 2.1.

$$W_{TNT} = \alpha \frac{E_{Exp}}{E_{mTNT}} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

- α : Rendimiento de la explosión
- E_{exp} : Energía liberada en la explosión
- E_{mTNT} : Calor de combustión TNT equivalente a $4,6 \times 10^6$ [J/kg]
- W_{TNT} : Masa equivalente de TNT

Respecto a los alcances y aplicaciones de esta metodología, el Manual de Métodos de Análisis de Riesgos y Consecuencias (MMARC) del Ministerio de Salud establece los siguientes criterios de cálculo (Ministerio de Salud, 2016):

- Esta metodología tendrá su ámbito de aplicación en aquellas sustancias químicas peligrosas que tengan riesgos de explosión o en su defecto producto de su reacción puedan ocasionar una explosión principalmente la Clase de riesgo 2.1, gases comprimidos o licuados inflamables.
- Para el caso de nubes densas (densidad de vapor superior a la del aire) se considera utilizar el doble de la masa equivalente de TNT (W_{TNT}) para evaluar las distancias reales, en vista de su efecto a nivel de suelo.

Para determinar la masa de TNT equivalente el MMARC define la ecuación 2.2, que se desprende de la ecuación 1 antes señalada:

$$W_{TNT} = \alpha \frac{ME_c}{E_{cTNT}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

- α : Factor de eficiencia de la explosión (10%)
- M: Masa de sustancia inflamable [kg]
- E_c : Calor inferior de combustión del gas inflamable [kJ/kg]
- E_{mTNT} : Calor de combustión TNT equivalente a 4.520 [kJ/kg]
- W_{TNT} : Masa equivalente de TNT [kg]

Una vez definida la masa de TNT equivalente, se procede a la determinación de la distancia escalada, conforme a la ecuación 2.3

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W_{TNT}}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

- Z: Distancia escalada [m/kg^(1/3)]
- R: Distancia objetivo de interés [m]
- W_{TNT} : Masa equivalente de TNT [kg]

La ecuación 3 debe ser evaluada en términos indirectos, mediante el gráfico de distancia escalada versus sobrepresión máxima. Como método alternativo, el MMARC propone el modelo de Sadovsky (ecuación 2.4) para determinar la sobrepresión en función de la distancia y la masa de TNT equivalente.

$$\Delta P = 0,95 \frac{\sqrt[3]{W_{TNT}}}{R} + 3,9 \frac{\sqrt[3]{W_{TNT}^2}}{R^2} + 13 \frac{W_{TNT}}{R^3} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde:

- ΔP : Sobrepresión máxima [atm]
- R: Distancia objetivo de interés [m]
- W_{TNT} : Masa equivalente de TNT [kg]

La figura 2-2 representa un diagrama de flujo básico para la aplicación del método TNT equivalente. A la izquierda se señalan los datos necesarios según cada etapa, a la derecha las ecuaciones de referencia y al centro los resultados de cada proceso aplicado.

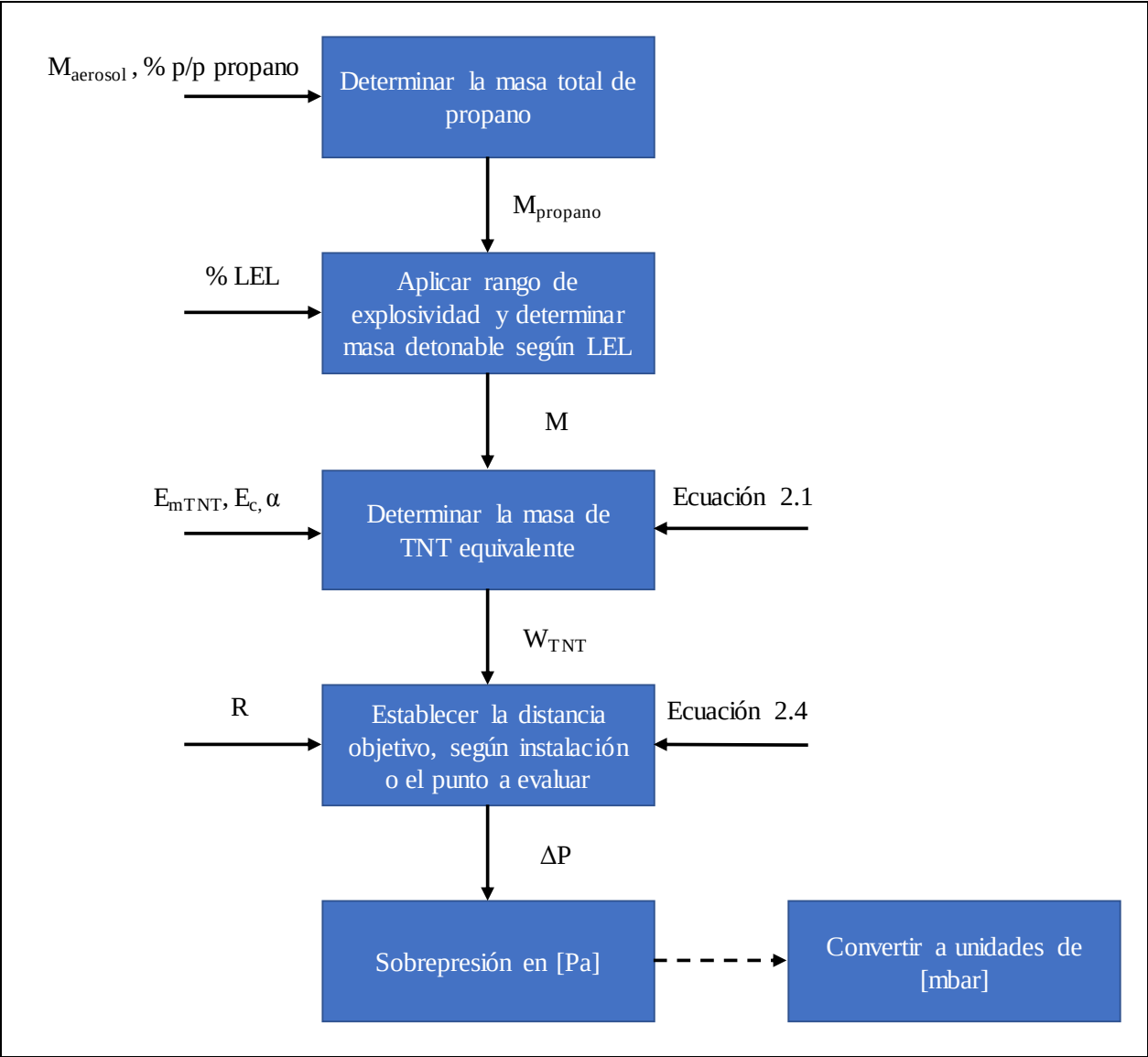


Figura 2-2: Algoritmo de cálculo metodología TNT equivalente
Fuente: (Fontenia, 2012)

La sobrepresión máxima debe ser transformada a unidades de [mbar] para compararla con el parámetro de tolerancia umbral definido por el Decreto N°43/2015 del MINSAL para efectos mecánicos, que en este caso corresponde a 125 [mbar]. El parámetro R corresponde a la distancia a la cual se logra dicha sobrepresión, medida desde el centro de explosión y distribuida en forma radial sobre un eje de referencia. En este sentido, la autoridad competente requiere verificar el cumplimiento de este parámetro umbral frente a las características de diseño asociado al recinto de almacenamiento (bodega de aerosoles) o bien demostrar que la resistencia estructural de este, son suficientes para tolerar la sobrepresión máxima estimada bajo esta metodología.

Uno de los principales problemas de este método es la determinación del parámetro “ α ”, señalado en la ecuación 2.2 y que representa el rendimiento de la explosión. Esta variable expresa la fracción de energía liberada que se invierte en generar la onda de presión o, dicho de otro modo, representa el coeficiente entre la energía real liberada y la teóricamente disponible. Por este motivo, se establecen varios casos en función de la tipología de explosiones (Fontenia, 2012):

- Eficiencia de la explosión para sustancias explosivas
- Eficiencia de la explosión para nubes de vapor
- Eficiencia de la explosión para estallido de recipientes

2.1.1 Eficiencia de la explosión para sustancias explosivas

En el caso de las sustancias explosivas, se adoptan valores de rendimiento del orden de la unidad, ya que se acepta que el factor de eficiencia es máximo.

2.1.2 Eficiencia de la explosión para nubes de vapor

En el caso de nubes de vapor, la eficiencia de la explosión es baja, ya que la mayor parte de la energía liberada se disipa en forma de calor, energía luminosa o llamarada, invirtiéndose solo una pequeña cantidad de energía en la generación de la onda de presión.

También se supone que toda la materia inflamable de la nube está disponible para la combustión y que la energía teóricamente disponible corresponde al producto de la cantidad total de materia inflamable en la nube por el calor de combustión. Sin embargo, bajo condiciones experimentales, se ha determinado un comportamiento diferente al señalado, dado que no toda la masa de la nube se encuentra en el límite de inflamabilidad. Sobre esta base, el rendimiento de la explosión está normalmente en el rango de 1 a 10%. De manera conservadora se adoptan valores entre 3 y 4%, es decir 0,03 y 0,04, no obstante, el MMARC adopta el valor 10% como parámetro aceptado de rendimiento para el cálculo de efectos mecánicos, tal como se señala en ecuación 2.

2.1.3 Eficiencia de la explosión estallido de recipientes

Se estima que en explosiones de recipientes que contienen un gas, la distribución de energía liberada mantiene la siguiente configuración:

- El 30% en la onda de presión.
- El 40% en la energía cinética conferida a los proyectiles.
- El 30% en otras formas de energía (calor, llamarada, etc)

Por convención, se sugiere utilizar el valor de 50% como factor de reparto aceptado para estos casos.

De la revisión de antecedentes disponibles en la literatura internacional consultada (TNO, 2005), se desprenden las siguientes características del modelo de equivalencia TNT:

- Establece una relación proporcional entre la masa de TNT y el contenido energético de la nube de vapor.
- El uso del rendimiento o factor de equivalencia “ α ”, basado en estadísticas, muestra una amplia distribución de baja precisión. Lo anterior, demuestra una contradicción en el concepto de correlación o equivalencia establecido, por cuanto ofrece valores de incertidumbre altos.
- No toma en cuenta la variabilidad de las fuerzas explosivas.
- No coinciden las características del estallido asociados a la explosión de nubes de vapor (distancia en función del factor de eficiencia).
- Predicciones sobrevaloradas para efectos mecánicos.
- Predice solo sobrepresiones (no la duración de la onda de choque).

2.1.4 Análisis del método TNT Equivalente

Las principales limitaciones del método TNT equivalente se deben principalmente a la gran diferencia existente entre la explosión de una nube de vapor y una explosión de TNT. La onda de sobrepresión debida a una explosión de TNT tiene una amplitud muy grande, pero es de corta duración, mientras que para las nubes de vapor la amplitud es menor y la duración mayor. Esto hace que para puntos muy próximos al origen de la explosión (aproximadamente hasta 3 veces el diámetro de la nube), el error derivado de este método sea grande, mientras que puntos alejados (distancias 10 veces el diámetro de la nube), la curva de sobrepresión v/s tiempo se aproxima mucho más a la ideal y, por tanto, los resultados obtenidos con este método serían mejores. En cualquier caso, si lo que se busca es determinar la resistencia de estructuras ante una determinada explosión de una nube de vapor, lo importante no es el valor puntual de sobrepresión sino la evolución de ésta en el tiempo (forma y duración de la fase positiva); en estos casos, es mejor utilizar algún otro método más apropiado (Casal, Montiel, Planas, & Vélchez, 2001).

2.2 Método basado en la carga de estallido aire-combustible

Este método desarrollado por Van den Berg¹ en 1985, permite predecir la forma, la duración, la sobrepresión y el impulso de la onda de sobrepresión de una manera sencilla y rápida. El método se basa en la suposición de que únicamente la parte de la nube que se encuentra parcial o totalmente confinada genera la onda de sobrepresión. Esto significa que la explosión de una nube de vapor será considerada como un conjunto de subexplosiones correspondientes a las distintas áreas de la nube que se encuentran parcialmente confinadas (Casal, Montiel, Planas, & Vílchez, 2001).

El modelo supone que toda el área confinada será ocupada por una mezcla estequiométrica combustible/aire. La carga generada por la combustión de esta mezcla se considera de forma semiesférica con un radio específico (ecuación 2.5), lo que considera que el estallido se produce a nivel de piso. Los parámetros del modelo (sobrepresión, duración, etc) en su forma adimensional están representados gráficamente (ver figura 2-3) en función de la distancia normalizada.

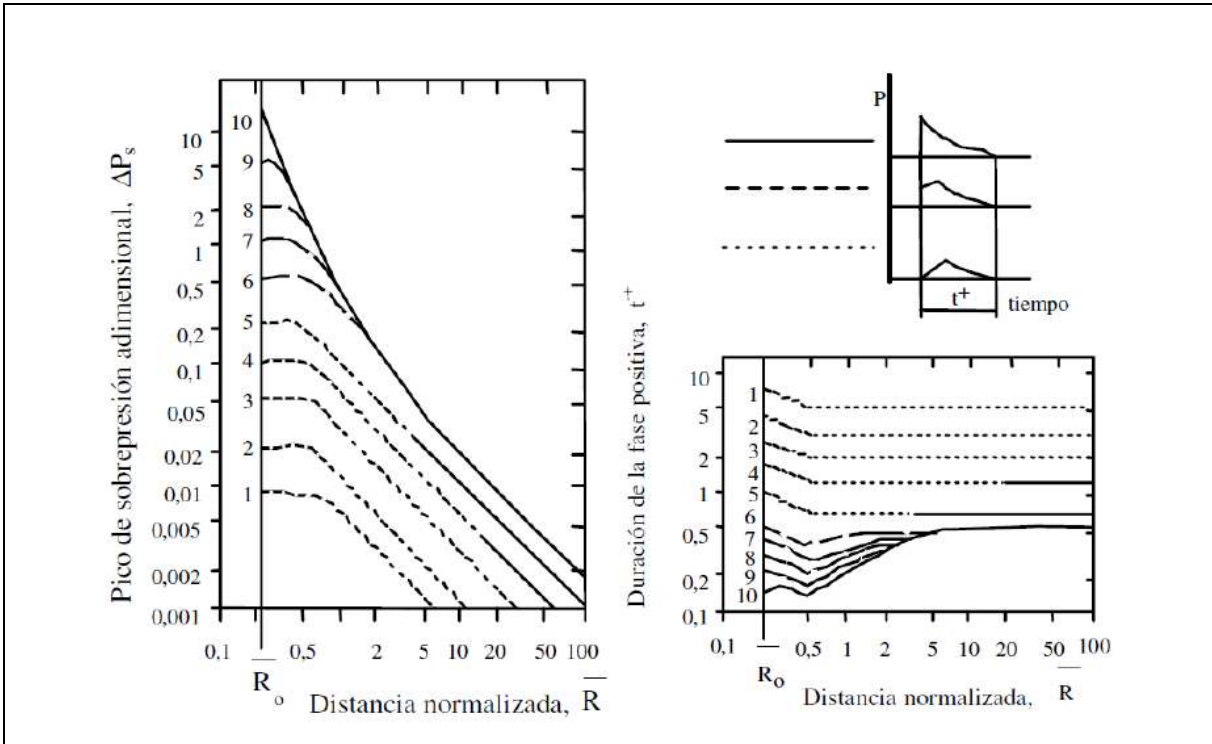


Figura 2-3: Diagrama simplificado calentamiento de aerosoles

Fuente: (Casal, Montiel, Planas, & Vílchez, 2001)

En cada gráfico se pueden observar diez curvas numeradas del 1 al 10. Se debe seleccionar el valor que corresponda a la energía explosiva inicial. Esta selección es una de las incertidumbres más relevantes del método, ya que difiere respecto de la longitud entre la distancia objetivo y el centro de la explosión.

¹ A.C. Van den Berg. The multi-energy method: A framework for vapor cloud explosion blast prediction. *Journal of Hazardous Materials*. December 1985

Para efectos de zonas cercanas se toma el valor 10, que es conservador ya que supone la existencia de una detonación (explosión de mayor poder), mientras que para puntos alejados se puede tomar cualquier valor mayor que 6, ya que los efectos en distancias largas no dependen de la energía inicial.

En específico, el método multienergía se basa en dimensionar de forma rápida y sencilla los siguientes fenómenos:

- Forma de la onda de sobrepresión
- Duración de la onda de sobrepresión
- Valor de la sobrepresión de la onda
- Valor del impulso de la onda de sobrepresión.

De la misma forma, las variables necesarias para aplicar el método propuesto requieren procesar los siguientes parámetros:

- Estimación de la masa detonable (ecuación 2.5)
- Determinación tamaño nube (ecuación 2.6)
- Determinación de la región no obstruida (ecuación 2.7)
- Estimar la energía liberada (ecuación 2.8)
- Estimar el radio equivalente de la nube (ecuación 2.9)
- Estimar distancia escalada (ecuación 2.10)

Antes de iniciar el algoritmo de cálculo es necesario establecer un proceso previo que determinará la geometría del sistema evaluado. Lo anterior, considerando que el método multienergía pondera los diferentes elementos, materiales o construcciones que afecten o restrinjan la propagación de la onda de choque desde el punto de ignición hasta su distancia de evaluación objetivo. Por este motivo, el método recomienda representar el sistema a evaluar con una geometría conocida que permita estimar el volumen total disponible para una explosión, asimilable a una “caja” con dimensiones de largo, ancho y alto.

Desde la perspectiva del presente trabajo, la “caja” corresponderá a las dimensiones de la bodega de aerosoles, asumiendo que toda la masa de propano permanecerá al interior del recinto. La figura 2-4 entrega información respecto a los elementos geométricos considerados para la aplicación del modelo y la configuración tipo “caja” construida.

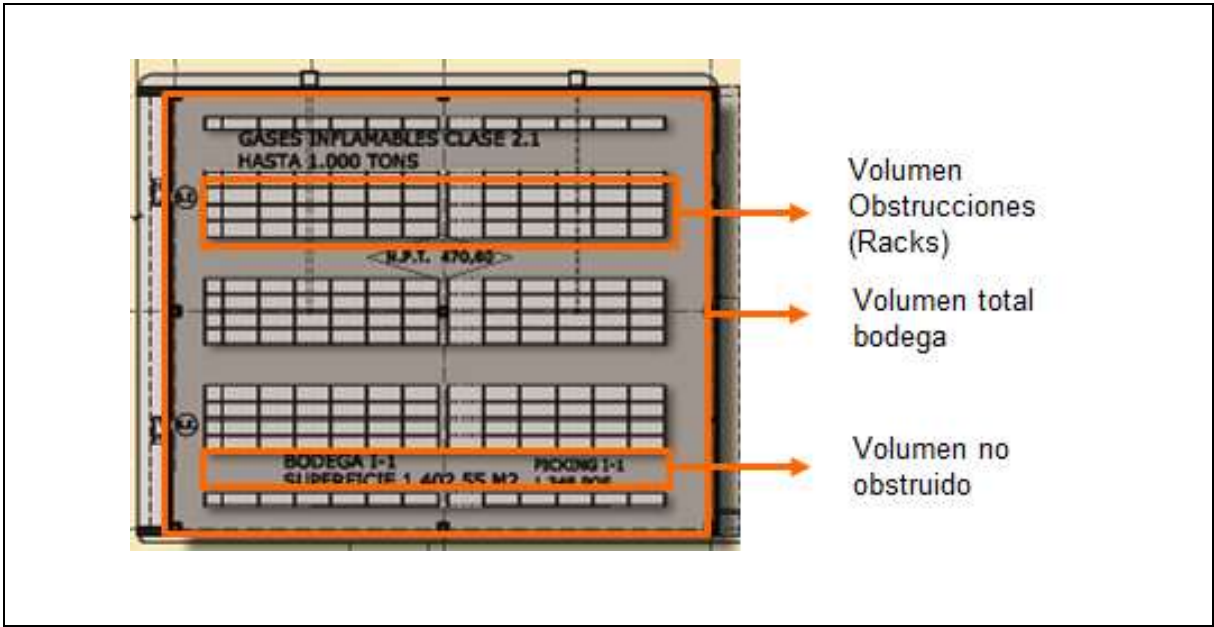


Figura 2-4: Gráfico para determinación de sobrepresión escalada
Fuente: Archivo ATM Proyecto Ecoclock

Una vez determinada la geometría de la “caja”, sus dimensiones y configuración interior, continúa el proceso de cálculo con el desarrollo de las ecuaciones 2.5 a la 2.10, según se detalla a continuación:

$$M_{detonable} = M_{almacenada} \times UEL \tag{Ecuación 2.5}$$

Donde:

- M_{detoable}: Masa total que puede ser usada para estimar sobrepresión [kg]
- UEL: Límite superior de explosividad

$$V_c = \frac{M_{detonable}}{(\theta_s \rho)} \tag{Ecuación 2.6}$$

Donde:

- V_c: Volumen nube [m³]
- M_{detonable}: Masa tota detonable [kg] (ver ecuación 5)
- θ_s: Concentración estequiométrica 4% (0,04)
- ρ: Densidad propano, 1,86 [kg/m³]

La ecuación 2.7 representa el cálculo del volumen no obstruido, que considera solo a los racks de almacenamiento como elemento prioritario y representativo de obstrucción interior.

$$V_0 = V_C - V_{gr}$$

Ecuación 2.7

Donde:

- V₀: Volumen no obstruido [m³]
- V_C: Volumen total de la bodega [m³]
- V_{gr}: Volumen de las obstrucciones (racks y carga) [m³]

$$E = E_v \times V_0$$

Ecuación 2.8

Donde:

- E: Energía liberada [MJ]
- E_v: Energía estequiométrica equivalente (3,46 [MJ/m³])
- V₀: Volumen no obstruido [m³] (ver ecuación 8)

$$r_0 = \sqrt[3]{\left(\frac{3}{2} \times \frac{V_C}{\pi}\right)}$$

Ecuación 2.9

Donde:

- R₀: Radio equivalente de la nube [m]
- V_C: Volumen no obstruido [m³]

$$r' = \frac{r}{\sqrt[3]{\left(\frac{E}{Pa}\right)}}$$

Ecuación 2.10

Donde:

- r': Distancia escalada [adimensional]
- r: Distancia objetivo [m]
- E: Energía liberada [MJ] (ver ecuación 8)
- Pa: Presión atmosférica [Pa]

La figura 2-5 representa un diagrama de flujo básico para la aplicación del método Multienergía. A la izquierda se señalan los datos necesarios según cada etapa, a la derecha las ecuaciones de referencia y al centro los resultados de cada proceso aplicado.

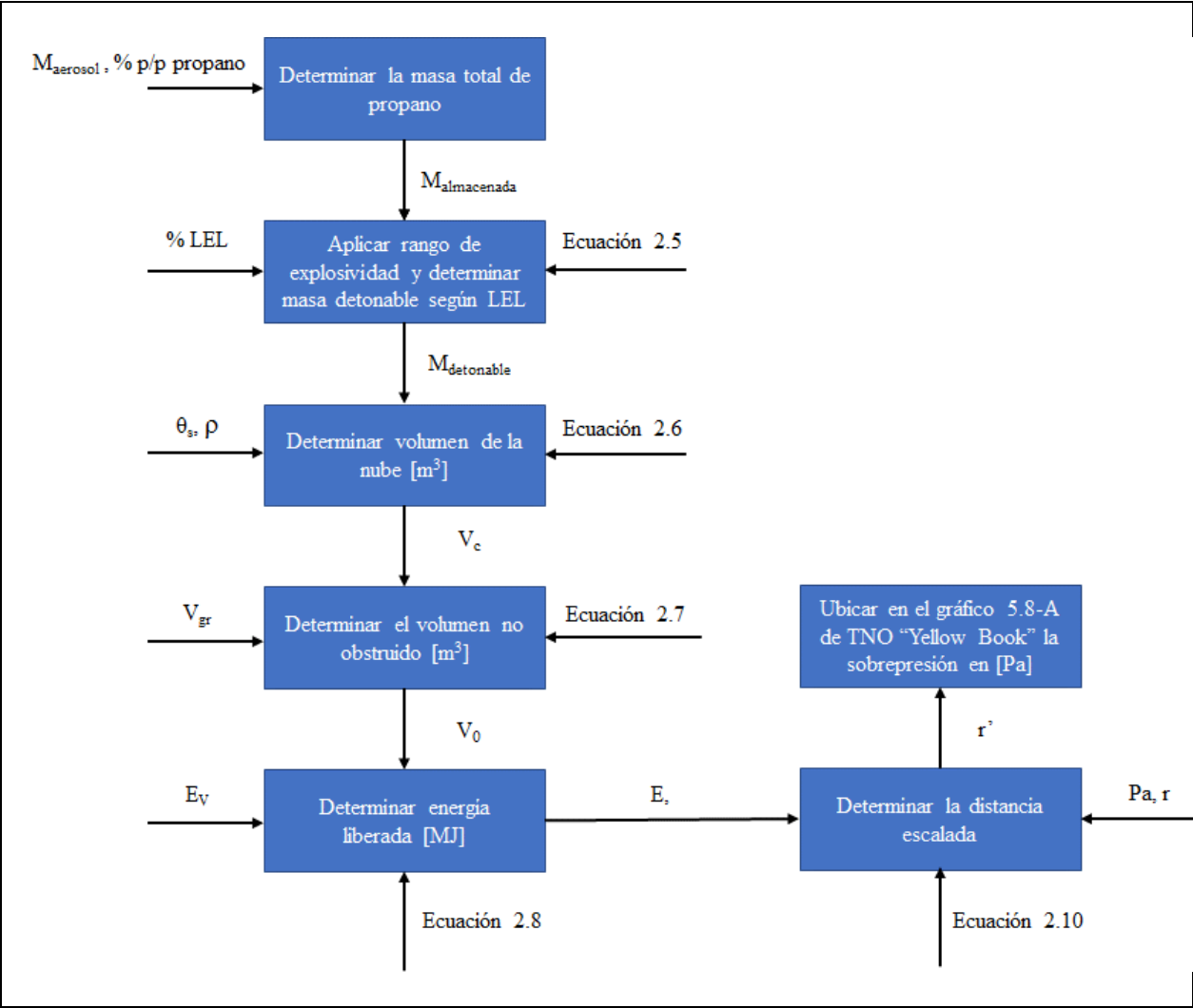


Figura 2-5: Algoritmo de cálculo metodología Multienergía
Fuente: (TNO, 2005)

Por definición, el método en función del escenario más desfavorable recomienda utilizar un valor 10 para determinar la fuerza de la fuente de origen. El valor 10 reconoce que se producirá una detonación de alto poder energético. Posteriormente, la distancia escalada obtenida en la ecuación 10, determina la sobrepresión escalada, a partir de la lectura del gráfico 5.8A del texto “Yellow Book” (TNO, 2005). La figura 2-6 muestra el gráfico de referencia, donde en el eje Y se ubica la sobrepresión escalada y en el eje X se ubica la distancia escalada. En el anexo 1 se presenta el gráfico señalado en la figura 2-5 a escala legible.

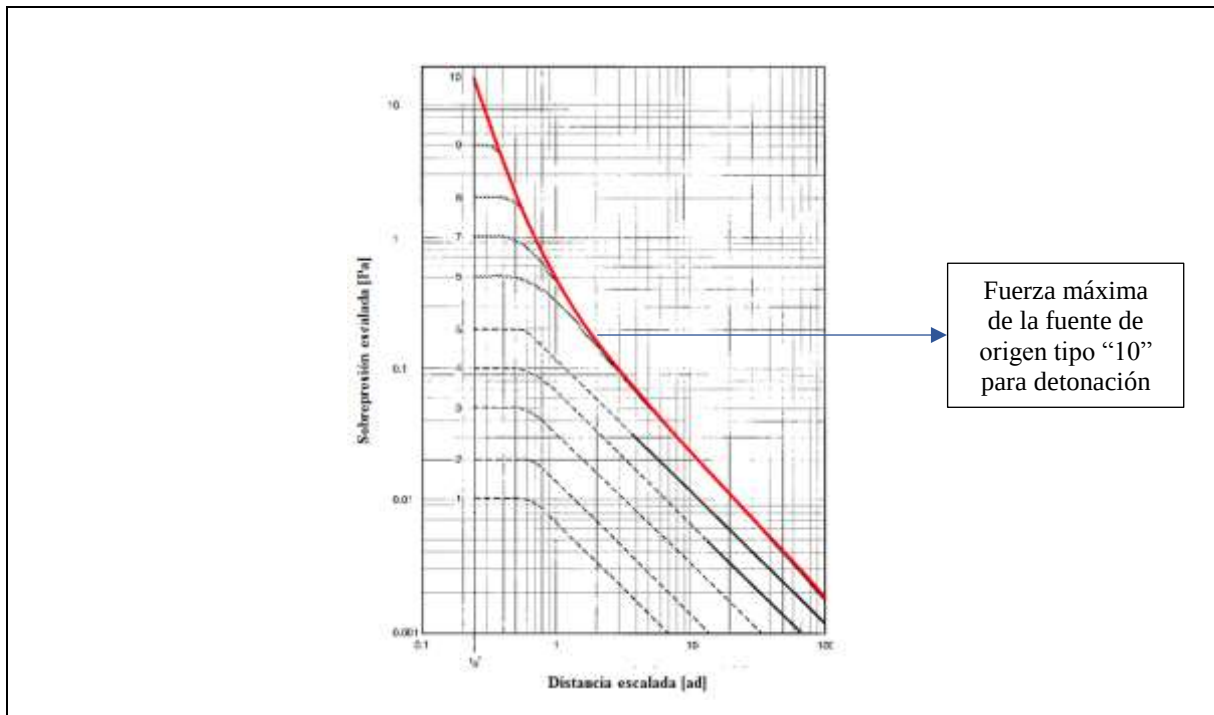


Figura 2-6: Gráfico para determinación de sobrepresión escalada

Fuente: Figura 5.8A (TNO, 2005)

2.2.1 Análisis del método MultiEnergía

La principal dificultad de este método es la de seleccionar el nivel de explosión adecuado, debido a la cantidad de parámetros que influyen en el proceso. La intensidad de la explosión dependerá finalmente de la masa y del tipo de combustible, de la concentración y del área obstruida, entendiendo esta como aquella zona en la que hay una elevada densidad de objetos, instalaciones o equipos. El método multi-energía ha sido demostrado como un modelo de cálculo razonablemente creíble para predecir tanto altas como bajas sobrepresiones, en los escenarios donde se esperan fenómenos del tipo explosivo. No obstante, diferentes autores han establecidos ciertos grados de libertad que deben ser manejados adecuadamente cuando se requiere predecir con precisión el comportamiento de una nube de vapor. En este contexto, se destacan los siguientes elementos:

- La sobrepresión en una región obstruida (la fuerza de la fuente y su respectiva clasificación). Lo anterior, dado que el modelo establece por defecto el nivel "10", dependiendo de las condiciones de confinamiento y la cantidad asociada, el fenómeno de detonación podría ser reemplazado por una deflagración, lo que resulta en una clasificación menor. Predicciones específicas podrían estar sobrestimadas a causa de una errónea selección de la fuente.

- La definición de región obstruida, que depende de la solución geométrica para cada escenario y que puede variar dependiendo del nivel de detalle o número de divisiones con que se quiera configurar. En función de lo anterior, un escenario evaluado por diferentes equipos puede entregar valores diferentes de sobrepresión, por cuanto este parámetro agrega incertidumbre frente a evaluaciones o predicciones de alta resolución.
- La mínima distancia entre la fuente de explosión y el objetivo en evaluación. El método sugiere ubicar el punto de inicio en una ubicación distinta al centro de la explosión, dado que en este punto la concentración es mayor y por ende deriva en una concentración alta de combustible (mezcla rica). La variación de este punto puede tener un impacto sobre la distancia del objetivo donde se busque evaluar la sobrepresión.

CAPÍTULO 3.0 APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CÁLCULO

El presente capítulo describe los recintos que serán evaluados según las metodologías expuestas en el capítulo 2 del presente estudio y comparar sus resultados respecto a los efectos mecánicos derivados ante una posible explosión. Para tal efecto, se utilizó la base de datos pública del Servicio de Evaluación Ambiental, perteneciente al Ministerio de Medio Ambiente, donde figuran todos aquellos proyectos ingresados a evaluación ambiental, conforme a lo señalado en el artículo 3, letra ñ.3 del Decreto N°40/2013 del MMA “Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental”, para aquellas instalaciones con almacenamiento superior a 80 [ton] de sustancias peligrosas inflamables. Este criterio fue seleccionado en virtud de las características de la información disponible y el tamaño de los proyectos (superior a 80 [ton]).

Para establecer el universo de proyectos de interés, se descargó una base de datos con todos aquellos proyectos relacionados a los siguientes criterios de búsqueda:

- Almacenamiento
- Sustancias peligrosas
- Sustancias químicas
- Bodegas
- Estanques
- Inflamables

Dichos criterios consolidaron un total de 98 proyectos a nivel nacional entre el año 2010 y 2018, aprobados ambientalmente o en tramitación, dejando de lados aquellos desistidos, no sometidos a trámites o rechazados. No se consideraron proyectos anteriores al año 2010, ya que el reglamento asociado al almacenamiento de sustancias peligrosas que incorporó los análisis de consecuencias para efectos mecánicos en bodegas de aerosoles entró en vigencia el 11 de septiembre de ese año. En el anexo 2 se presenta el listado con los 98 proyectos filtrados a partir de la base de datos consultadas, que incluyen el nombre de cada proyecto, su región monto de inversión, tipología de proyecto y fecha de ingreso.

Posteriormente, fueron separados aquellos proyectos clasificados como inflamables o no inflamables, de los cuales un total de 53% corresponde a la clase de riesgo 2.1 (gases comprimidos inflamables) o clase de riesgo 3 (líquidos inflamables), mientras que un 71% de estos últimos fueron emplazados en recintos del tipo bodega.

Finalmente, se seleccionaron 4 proyectos que contemplan bodegas de aerosoles, los cuales serán sometidos a las metodologías especificadas en el capítulo 2 y que cumplen con las siguientes características:

- Almacenamiento en bodega
- Almacenamiento de aerosoles, clase de riesgo 2.1 “gases comprimidos inflamables”
- Cuentan con resolución de calificación ambiental favorable, por cuanto la autoridad sanitaria se pronunció favorablemente en referencia a los antecedentes técnicos presentados por el titular (análisis de consecuencias para efectos mecánicos).
- Disponen de antecedentes técnicos de acceso público

La tabla 3-1 resume los 4 proyectos seleccionados y que además fueron estudiados por la empresa ATM Consultores. De esta forma, se disponen de todos los antecedentes técnicos necesarios para verificar el alcance de los criterios de cálculo y los resultados obtenidos. La tipología señalada en la tabla 3-1 corresponde a la causal de ingreso del proyecto, respecto de la definición correspondiente para una Declaración de Impacto Ambiental, conforme al Decreto N°40/2012 del MMA, donde su clase de riesgo y cantidad configuran la tipología respectiva. Esta propiedad, no es excluyente respecto a otras clases de riesgo o cantidades almacenadas por un proyecto determinado, sino solo se limita a identificar la causal de ingreso principal.

Cabe destacar que estos 4 proyectos corresponden al 31% del total de la inversión contemplada entre el año 2010 y 2018 para almacenamiento de sustancias peligrosas, totalizando un monto de US\$83.000.000, siendo la “Planta de almacenamiento de productos químicos – Portland Noviciado” la iniciativa de mayor envergadura presentada hasta la fecha. No obstante, se aclara que los proyectos números 3 y 4 señalados en la tabla 3-1 corresponden a centros de almacenamiento con múltiples bodegas y estanques.

Tabla 3-1: Proyectos seleccionados para aplicación metodológica

N°	Nombre	Región	Tipología	Clase Riesgo	Inversión (MM US\$)	Fecha Presentación
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	RM	ñ3	Inflamable	0,3659	23-abr-2018
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	RM	ñ3	Inflamable	4,0000	3-may-2017
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	RM	ñ1	Inflamable	60,0000	19-may-2016
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	RM	ñ4	Inflamable	16,0000	27-dic-2012

Fuente: Servicio de Evaluación Ambiental

RM: Región Metropolitana

ñ1: Capacidad de almacenamiento de sustancias tóxicas en una cantidad igual o superior a 30.000 [Kg]

ñ3: Capacidad de almacenamiento de sustancias inflamables en una cantidad igual o superior a 80.000 [Kg]

ñ4: Capacidad de almacenamiento de sustancias corrosivas en una cantidad igual o superior a 120.000 [Kg]

Respecto a las cantidades almacenadas por cada proyecto seleccionado, la tabla 3-2 resume las características de cada recinto que será analizado, en función de los datos disponibles en la plataforma digital del Servicio de Evaluación Ambiental.

Tabla 3-2: Resumen características proyectos en evaluación

N°	Proyecto	Superficie [m²]	Cantidad almacenada [ton]	Tipo de almacenamiento
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	282	346,5	Bodega para sustancias peligrosas exclusiva para inflamables del tipo separada
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	4.055	734,0	
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	1.386	700,0	
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	1.403	1.000,0	

Fuente: Servicio de evaluación ambiental

Los parámetros de la tabla 3-2 corresponden a los límites de tolerancia definidos en el Manual de Métodos de Análisis de Riesgos y Consecuencias del MINSAL, exigidos en el artículo 44 del Decreto N°43/2015 del MINSAL.

Todas estas instalaciones fueron evaluadas a partir de un análisis de consecuencias para efectos mecánicos, en base a la estimación de sobrepresión y el cumplimiento de los parámetros umbrales señalados en la tabla 3-3.

Tabla 3-3: Parámetros de tolerancia umbral para efectos mecánicos

Daños personales	Sobrepresiones [bar]	Daños estructurales	Sobrepresiones [bar]
Umbral de muerte por lesión pulmonar	0,700	Demolición total	0,800
Umbral de rotura de tímpano	0,350	Daños irrecuperables	0,400
Umbral zona de intervención	0,125	Daños estructurales importantes	0,150
Umbral zona de alerta	0,050	Daños graves reparables	0,150

Fuente: Methods for the determination of possible damage (Green Book). Chapter 2 The consequences of explosion effects on structures – Damage Criteria Table 5

Respecto a los aerosoles, serán abordados según la descripción de las hojas de seguridad disponibles en la base de datos de ATM Consultores, en referencia a los proyectos mencionados, según la NCh 2245:Of.2015. La composición de los aerosoles considera mayoritariamente al propano como gas propelente y ha sido utilizado por la Autoridad Sanitaria como sustancia de referencia para el cálculo de sobrepresión en los análisis de consecuencias para efectos mecánicos, según las metodologías establecidas en el Decreto N°43 del MINSAL.

La identificación de la sustancia peligrosa se muestra en la tabla 3-4, mientras que las propiedades físicas y químicas del propano son señaladas en la tabla 3-5.

Tabla 3-4: Identificación sustancia peligrosa aerosoles

Nombre comercial:	Aerosoles
Clasificación NU:	1950
Componente activo propelente:	Propano
Porcentaje de mezcla:	50% p/p
Nota: Los 4 proyectos serán calculados con el mismo gas propelente y su respectivo porcentaje, según criterio aceptado por la autoridad sanitaria para el cálculo de sobrepresión	

Fuente: Hoja de seguridad NCh 2245:Of.2015

Tabla 3-5: Propiedades físicas y químicas propano

Fórmula Química:	C ₃ H ₈
Número CAS:	74-98-6
Peso Molecular:	16,04 [gr/mol]
Grupo Químico:	Alcanos
Apariencia:	Gas incoloro
Temperatura de Ebullición:	-42,1 °C
Temperatura de Fusión:	-188 °C
Presión de vapor a 20°C:	258.574 [mmHg]
Densidad de vapor a 20 °C (relativo al aire=1):	1,522
Densidad a 15 °C:	1,86 [Kg/m ³]
Gravedad específica:	0,508
Solubilidad en agua:	2,5 mL en 100 mL de agua a 17 °C
Riesgo Principal:	Inflamable

Fuente: Hoja de seguridad NCh 2245:Of.2015

Las propiedades termodinámicas del propano son expuestas en la tabla 3-6, necesarias para la aplicación de las metodologías discutidas más adelante.

Tabla 3-6: Propiedades termodinámicas del propano

Propiedad	Valor	Unidad
Calor de Combustión	46.360,00	KJ/Kg
Calor de Vaporización	343,00	KJ/Kg
Calor Específico	1,67	KJ/Kg °C
Temperatura Referencia	22,55	°C
Temperatura de Ebullición	230,95	K
Límite inferior de explosividad (LEL)	2,1	%
Límite superior de explosividad (UEL)	9,5	%

Fuente: Fire Protection Handbook 20th Edition 2008 National Fire Protection Association NFPA

Todos los recintos identificados en la tabla 3-2 corresponden a bodegas con geometría rectangular, orientada con medidas de largo, ancho y alto, según lo señalado en la figura 3-1. Los racks interiores se ubican longitudinalmente ordenados en forma unitaria o múltiple, según la disposición otorgada por el diseño de arquitectura.

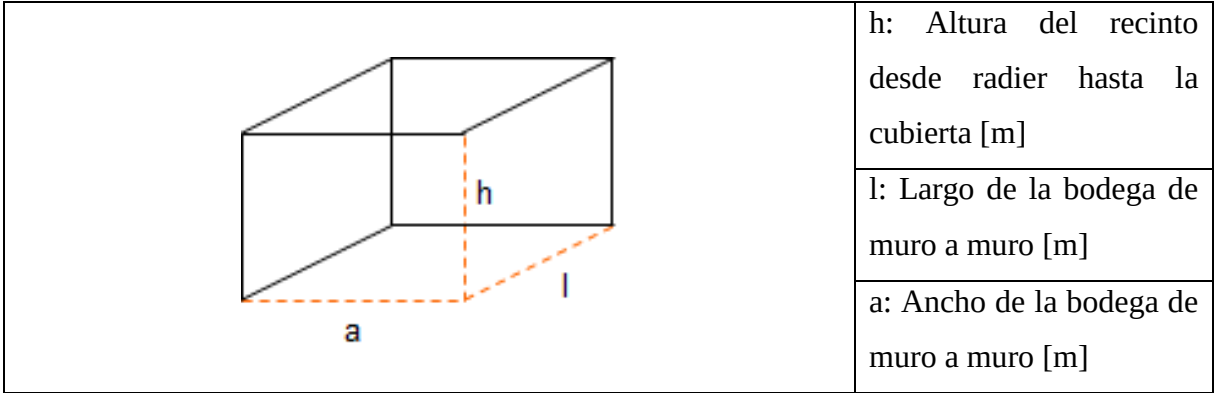


Figura 3-1: Distribución geométrica para cada recinto evaluado.

Fuente: Elaboración propia

De la información contenida en el archivo digital del Sistema de Evaluación Ambiental y los datos disponibles en la base de datos de ATM Consultores, se construyó la tabla 3-7 con las dimensiones y características de cada recinto señalado en la tabla 3-2.

Tabla 3-7: Dimensiones y características de cada recinto identificado

N°	Proyecto	Características Constructivas	Dimensiones bodega		
			l [m]	a [m]	h [m]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	Hormigón armado tipo H-40	64,70	7,35	11,71
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	Hormigón armado tipo H-40	83,96	48,30	11,70
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	Hormigón armado prefabricado tipo H-40	38,0	35,0	8,70
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	Hormigón armado tipo H-40	32,4	40,0	10,0

Fuente: Servicio de evaluación ambiental

Luego la tabla 3-8 señala las dimensiones de los racks de almacenamiento para cada recinto evaluado, junto a la cantidad total de aerosoles declarada y autorizada en su Resolución de Calificación Ambiental. Cada bodega tiene una cantidad diferente de racks, los cuales serán considerados durante la etapa de cálculo para determinar el volumen de obstrucción, según se explicó en el capítulo 2.

Tabla 3-8: Dimensiones de cada rack de almacenamiento

N°	Proyecto	Cantidad almacenada [ton]	Dimensiones rack		
			l [m]	a [m]	h [m]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	346,5	62,70	1,50	10,71
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	734,0	80,96	1,50	10,70
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	700,0	30,00	1,50	7,00
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	1.000,0	34,00	1,50	9,00

Fuente: Servicio de evaluación ambiental

3.1 Características de diseño de las bodegas de almacenamiento

Los proyectos identificados en las tablas 3-1 y 3-2 contemplan una serie de controles de ingeniería tendientes a minimizar la ocurrencia de un incidente, junto con enfrentar emergencias del tipo incendio, derrame o explosión.

Las medidas de protección pasiva establecidas en el artículo 74, Decreto N°43/2015 del MINSAL para bodegas de almacenamiento de aerosoles superior a 350 [ton] condicionan la característica de los muros perimetrales a un hormigón armado tipo H-40. Cabe destacar que esta denominación (H-40) cambió el año 2016 con la actualización de la norma técnica de referencia NCh 170:2016 “Hormigón – Requisitos Generales”, ya que hoy se identifica como G-40 en virtud del cambio de la antigua probeta cúbica de muestreo 200 [mm] a una probeta cilíndrica de la misma dimensión. De acuerdo con esta normativa, el hormigón G-40 tiene una resistencia a la compresión de 40 [MPa], el cual es considerado por la normativa vigente como la medida de protección pasiva preferente frente al escenario de explosión por aerosoles.

Adicionalmente, las bodegas deberán ser cerradas en su perímetro por muros resistentes a la acción del agua, con techumbre y piso sólido resistente estructural y químicamente, liso, lavable e impermeable y no poroso (artículo 35 Decreto N°43/2015 MINSAL). El techo de las bodegas deberá ser colapsable, para permitir la evacuación vertical de la onda de choque en caso de una explosión. La figura 3-2 muestra la configuración interior típica correspondiente a un recinto para almacenamiento de aerosoles superior a 350 [ton].



Figura 3-2: Configuración interior bodega almacenamiento aerosoles

Fuente: Proyecto Imolog – Comuna Lampa, Región Metropolitana

La figura 3-2 muestra los muros perimetrales en base a hormigón armado tipo G-40, racks de 3 niveles orientados al centro del recinto, techo liviano colapsable y un sistema de extinción automático contra incendios. Respecto a este punto, correspondiente a las medidas de protección activa, es requisito para las bodegas que almacenan aerosoles, contar con un sistema de detección y extinción automático contra incendios, en base a rociadores de agua (*sprinklers*) en la parte superior y en el centro de cada nivel asociado a los racks. La detección contra incendios utiliza un sistema infrarrojo detector de llama, sensores de humo y gas combustible, en caso de una liberación de gas. Sistemas manuales complementarios de detección de incendios, como pulsadores y sistemas de extinción como gabinetes de mangueras y extintores, son distribuidos conforme a la disposición del proyecto de ingeniería contra incendios y el artículo 46 del Decreto N°594/2015 del MINSAL.

Adicionalmente, los recintos deben utilizar sistemas eléctricos a prueba de explosión (ATEX), de acuerdo con el artículo 90 del Decreto N°43/2015 del MINSAL, junto a un sistema de ventilación forzada en su inyección y extracción, cuyos criterios de diseño deberán estar acorde a las sustancias almacenadas y a las actividades permitidas en su interior, alcanzando como mínimo un flujo de $0,3 \text{ [m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^2]$ (artículo 40, Decreto N°43/2015 MINSAL). Esta medida tiene por objetivo controlar las condiciones atmosféricas interiores del recinto y restringir la posibilidad de que se generen concentración de gases suficientes para alcanzar el límite inferior de explosividad (LEL).

Respecto a la configuración interior de las bodegas, la normativa legal vigente establece una distancia mínima de 1,5 [m] entre los productos almacenados y los muros perimetrales, para bodegas con capacidad superior a las 350 [ton]. Esta medida fue adoptada del anterior Decreto N°78/2010 del MINSAL, en referencia a los cálculos de efectos mecánicos bajo la metodología TNT equivalente, que identificaron una distancia teórica de 1,5 a 2,0 [m] para representar una zona libre de almacenamiento, donde la onda de choque perdía suficiente fuerza hasta entrar en contacto con el muro tipo G-40. Dada la distribución radial de la onda de choque, es incompatible atribuir a la resistencia de compresión (G-40), la misma resistencia de tracción, por cuanto el principio preventivo no es aplicable y no reviste una medida de protección pasiva efectiva.

En virtud de los recintos identificados anteriormente y los métodos descritos en el capítulo 2, se desarrollará la estimación de sobrepresión máxima conforme a los parámetros umbrales definidos por el Decreto N°43/2015 del MINSAL.

Para la elaboración del cálculo de sobrepresión se han seleccionado los siguientes criterios y condiciones de borde necesarias, en función de cada metodología seleccionada a saber, TNT equivalente y modelo Multi-Energía:

- a) **Condiciones meteorológicas:** Temperatura ambiental 15°C y presión atmosférica 1 [atm] (101.325 [Pa]). No obstante, dado que los 4 recintos evaluados se ubican en la ciudad de Santiago, a una altura aproximada de 500 [m] sobre el nivel del mar, se ajustó la presión atmosférica a 0,942 [atm] o 95.448,15 [Pa]. La estimación de sobrepresión máxima no requiere condiciones de viento (dirección y velocidad), humedad relativa del aire, precipitaciones u otro parámetro meteorológico.
- b) **Cantidad de gas propelente:** De acuerdo a la información entregada en la tabla 3-4, la autoridad sanitaria ha definido como criterio válido, que los aerosoles inflamables presentan un 50% de gas propelente. Por este motivo, se asume que la cantidad total declarada en la tabla 3-8 contiene un 50% de propano, el cual será utilizado para la estimación de sobrepresión en ambas metodologías.
- c) **Masa total detonable:** En virtud de que solo una fracción de la masa de propano total almacenado puede generar concentraciones suficientes dentro del rango de explosividad, es necesario estimar este valor según las cantidades almacenadas de aerosol. Por este motivo, se determina que solo la concentración de propelente situada en el rango entre un 2,1% y 9,5% en masa (ver tabla 3-6), tienen la capacidad para producir una explosión. Este criterio será utilizado en ambas metodologías, pese a que el MMARC del MINSAL no lo incorpora como variable a considerar. El límite inferior de explosividad será utilizado para determinar la masa total detonable, ya que asume el escenario más probable en términos de formación del rango de explosividad.
- d) **Cantidad liberada:** De acuerdo con las estimaciones de sobrepresión máxima para bodegas, aprobadas por la autoridad sanitaria, se debe asumir que toda la masa detonable es liberada en forma instantánea desde los envases de aerosoles y participa simultáneamente en el estallido. Este escenario se considera poco probable ya que estudios específicos han demostrado que solo una fracción de los aerosoles tiene la capacidad de desarrollar una nube de vapor con consecuencias explosivas (HSE, 2012). No obstante, para el cálculo de sobrepresión máxima se utilizará el criterio actual de la autoridad sanitaria nacional.

- e) **Riesgo para las personas expuestas:** Tanto el límite inferior de explosividad (21.000 [ppm]) como el límite superior de explosividad (95.000 [ppm]), se encuentran por sobre el umbral inmediatamente peligroso para la vida o IPVS (2.100 [ppm]), por cuanto personas eventualmente expuestas a la concentración de borde necesaria para una explosión, manifestarán síntomas de intoxicación previos. Ambas metodologías no contemplan la exposición de indicadores biológicos como variable de cálculo.
- f) **Medidas de protección pasiva y activa:** Ambas metodologías de cálculo asumen que no existen o no funciona ningún sistema de protección pasivo y activo. Lo anterior significa que la concentración de vapores no fue identificada por los sistemas de detección contra incendios y las fuentes de ignición no fueron controladas. De la misma forma, no se contempla la existencia de muros perimetrales, techos colapsables o sistemas de ventilación que impidan la salida de vapores inflamables al exterior, evitando su confinamiento.
- g) **Distancia objetivo:** De acuerdo al MMARC del MINSAL, la distancia hacia cualquier objetivo para la medición de efectos mecánicos debe ser considerada desde el centro de la explosión, el cual estará ubicado en el centro de la bodega y será también la coordenada de inicio de la liberación. Tal como se evidenció en el capítulo 2, este principio constituye una baja probabilidad de ocurrencia, dado que en ese punto existirá una mezcla rica. No obstante, el cálculo de sobrepresión mantendrá el centro de la bodega como centro de la explosión. El método Multi-Energía determina que es necesario ubicar este punto en base al escenario en evaluación. De esta forma, se ha determinado un criterio de selección para el punto de ignición o inicio del estallido a una distancia de 5 [m], perpendicular al centro de la explosión.

3.2 Aplicación método TNT equivalente

Para la aplicación del método TNT equivalente se determinó que la masa total detonable correspondería al límite inferior de explosividad, dado que se requiere alcanzar al menos esta condición para que se produzca una explosión.

La tabla 3-9 muestra los resultados de sobrepresión máxima obtenidos a partir de ecuación 2.2 para determinar la masa equivalente de TNT y ecuación 4 para establecer la diferencia de presión (ΔP), según los límites umbrales definidos en la tabla 3-3, para cada caso de estudio.

Tabla 3-9: Distancia en función del límite umbral

N°	Recinto en evaluación	Distancia [m]		
		800 [mbar]	400 [mbar]	125 [mbar]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	56,7	82,0	172,4
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	72,8	105,3	221,4
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	71,6	103,6	217,9
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	80,7	116,7	245,5

Fuente: Elaboración propia

Paralelamente, la tabla 3-10 muestra la sobrepresión máxima alcanzada en función del radio específico para cada bodega estudiada. Este radio corresponde a la mitad de la longitud de uno de los lados (largo o ancho), ya que considera que la explosión se produce en el centro del recinto. El modelo asume que no existen obstrucciones al interior del recinto, la onda de choque se propaga sin interferencia, hasta alcanzar el muro perimetral de la bodega. Este elemento constructivo debe tolerar la sobrepresión máxima calculada de acuerdo con la distancia en que se posicione.

Tabla 3-10: Sobrepresión máxima en función del radio en cada bodega

N°	Recinto en evaluación	Radio de la bodega [m]	Sobrepresión máxima [mbar]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	32,4	2.705
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	42,0	2.637
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	19,0	18.750
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	20,0	22.490

Fuente: Elaboración propia

Los valores indicados en la tabla 3-10 fueron obtenidos a partir de la ecuación 2.4, variando la distancia objetivo de interés (R). Los resultados exceden los parámetros umbrales conocidos, ya que sobre los 1.000 [mbar] o 1 [bar] se considera la destrucción total del edificio. De la misma forma, referencias internacionales establecen que una nube de vapor no podría generar una sobrepresión superior a 1.000 [bar] en una bodega de aerosoles (HSE, 2012), por cuanto los valores obtenidos estarían sobredimensionados.

En el anexo 3 se presenta la memoria de cálculo respectiva para cada caso de estudio y referenciado según las ecuaciones descritas anteriormente.

3.3 Aplicación método Multi-Energía

Tal como se detalló en el capítulo 3, el método multi-energía requiere determinar la geometría del recinto a evaluar, simplificando su configuración a una figura tridimensional denominada caja, que utiliza la longitud de cada trazo de acuerdo a los valores señalados en la tabla 3-7. De la misma forma, las obstrucciones consideradas como representativas corresponden a los racks que apilan cada una de las posiciones de carga dispuestas en pallets de madera. Las dimensiones de estos equipos han sido señaladas en la tabla 3-8 conforme a los recintos identificados para evaluación. No obstante, se ha determinado que los racks no constituyen una obstrucción ideal, ya que presentan espacios abiertos entre cada posición y su parte superior, por cuanto para efectos de cálculo se propone utilizar un criterio correspondiente al 75% de congestión, que restará un 25% al volumen de obstrucción calculado en base a los datos de la tabla 3-8.

La tabla 3-11 señala los volúmenes respectivos calculados según las medidas expuestas en la tabla 3-7 y que configuran la geometría (caja) para determinar la magnitud de la sobrepresión.

Tabla 3-11: Volumen estimado para cada recinto en evaluación

N°	Proyecto	Volumen total bodega [m³]	Volumen obstrucción [m³]	Volumen disponible [m³]	Volumen nube [m³]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	5.568,63	3.021,83	2.546,81	1.956,05
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	47.446,64	38.982,24	8.464,40	4.143,55
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	11.557,70	3.543,75	8.013,95	3.951,6
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	16.000,00	1.377,00	14.623,00	5.645,16

Fuente: Elaboración propia

Los volúmenes de cada bodega fueron obtenidos a partir de las relaciones descritas en la ecuación 6 y 7, según las dimensiones indicadas en las tablas 3-7 y 3-8. La configuración de cada recinto y su disposición interna ha sido determinada según criterios de arquitectura y operación de cada actividad, en función de las características de sus envases, envoltorios y tipo de producto almacenado. De la misma forma, la altura de los racks difiere en cada recinto evaluado, por cuanto puede existir una mayor densidad de aerosoles por metro cuadrado, según la cantidad de niveles que disponga el rack. Algunas empresas disponen de una menor cantidades de niveles, distribuyendo la totalidad de la carga sobre una superficie mayor. Por este motivo, no existe una correlación lineal entre la superficie disponible y la cantidad total almacenada.

El volumen de la nube calculado y mostrado en la tabla 3-11 corresponde a la condición LEL de cada recinto en función de la masa involucrada y su respectiva densidad. En todos los casos se verificó que el volumen de la nube es inferior al volumen disponible, por cuanto la formación de una nube con estas dimensiones resulta teóricamente posible.

La tabla 3-12 resume los resultados obtenidos para sobrepresión máxima en función de la distancia, según los criterios umbrales definidos. La memoria de cálculo respectiva se presenta en el anexo 4 para cada caso estudiado.

Tabla 3-12: Distancia en función del límite umbral

N°	Recinto en evaluación	Distancia [m]		
		800 [mbar]	400 [mbar]	125 [mbar]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	31,9	57,9	111,8
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	39,9	74,4	143,5
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	39,2	73,2	141,3
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	44,2	82,5	159,11

Fuente: Elaboración propia

La sobrepresión máxima en función del radio de cada bodega es informada en la tabla 3-13 para cada caso estudiado, obtenida a partir de la ecuación 2.8 y 2.10, que determinaron la energía liberada y la distancia escalada. Los valores señalados están en el rango de 1 [bar] a 2 [bar], que pese a ser elevados, son consistentes con una detonación teórica de alto poder energético. El criterio de distancia mostrado en la tabla 3-13 es equivalente al utilizado en la metodología del TNT equivalente, por cuanto se podrá definir una comparación objetiva entre ambos modelos utilizados.

Tabla 3-13: Sobrepresión máxima en función del radio en cada bodega

N°	Recinto en evaluación	Radio de la bodega [m]	Sobrepresión máxima [mbar]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	32,4	954,5
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	42,0	715,9
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	19,0	3.340,7
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	20,0	2.386,2

Fuente: Elaboración propia

Respecto a los valores obtenidos, cabe destacar que el desarrollo de la metodología incluyó un criterio de desempeño catastrófico donde se utilizó la curva de fuerza de la fuente con el valor 10 que corresponde a una detonación. El uso de curvas más cercanas al fenómeno de deflagración (valores entre 7 y 9) puede derivar en sobrepresiones más ajustadas al límite superior de referencia para el fenómeno estudiado. En este contexto, existe también incertidumbre en el valor estimado, debido a que la lectura gráfica de la distancia y sobrepresión reducida no es exacta, por cuanto la sobrepresión máxima informada en la tabla 4-5 es una aproximación razonable al modelo utilizado.

CAPÍTULO 4.0 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE MEJORA

La aplicación y el desarrollo de los modelos descritos en el capítulo 3 sobre los escenarios de cálculo identificados para el almacenamiento de aerosoles, permiten verificar la existencia de diferencias evidentes sobre el comportamiento de la sobrepresión máxima, a consecuencia de un escenario teórico de explosión. La expresión de resultados incluyó la estimación de sobrepresión en función de la distancia objetivo (muro perimetral de la bodega) y la sobrepresión en función de los umbrales de tolerancia definidos por el MMARC del MINSAL, sobre distintas configuraciones de superficie y cantidad almacenada.

La tabla 4-1 muestra un cuadro comparativo de la sobrepresión resultante en cada caso, según el parámetro umbral de tolerancia descrito. De la misma forma, la tabla 4-2 relaciona las diferentes sobrepresiones máximas, según cada metodología aplicada.

Tabla 4-1: Cuadro comparativo distancia en función de límite umbral.

N°	Recinto en evaluación	Método			Método		
		TNT Equivalente			Multi-Energía		
		800 [mbar]	400 [mbar]	125 [mbar]	800 [mbar]	400 [mbar]	125 [mbar]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	56,7	82,0	172,4	31,9	57,9	111,8
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	72,8	105,3	221,4	39,9	74,4	143,5
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	71,6	103,6	217,9	39,2	73,2	141,3
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	80,7	116,7	245,5	44,2	82,5	159,1

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-2: Cuadro comparativo sobrepresión en función de la distancia objetivo.

N°	Recinto en evaluación	Radio de la bodega [m]	Sobrepresión máxima [mbar]	
			Método TNT	Método Multi-Energía
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	32,4	2.705	954,5
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	42,0	2.637	715,9
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	19,0	18.750	3.340,7
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	20,0	22.490	2.386,2

Fuente: Elaboración propia

Los resultados según umbrales de tolerancia y distancia objetivo en evaluación (muro perimetral de la bodega), muestran diferencias sustanciales entre ambos métodos de cálculo. En el caso de la metodología TNT equivalente, para distancias inferiores a 35 metros desde el punto de origen, se presentan valores superiores a los 145 [PSIg]. En comparación con la figura 1-1, la estimación de sobrepresión está en el rango de 100 [PSIg] que corresponde a una dimensión superior al comportamiento esperado por una explosión de nube de vapor, ubicada en el rango de los 10 [PSIg] o 0,7 [bar]. Estos antecedentes establecen que la magnitud calculada no corresponde al fenómeno descrito al interior de las bodegas de aerosoles, por cuanto el método del TNT equivalente propone valores sobredimensionados.

Los valores estimados por el método TNT equivalente se aproximan a las explosiones de vapor o detonaciones de recipientes cerrados, que tal como se explicó en el capítulo 2 corresponde a fenómenos y comportamientos que difieren del estudiado. De la misma forma, la figura 1-3 presenta una sobrepresión *peak* de 17,5 [bar] para una detonación de propano, bajo condiciones extremas de confinamiento. Los valores expresados por la tabla 4-2 para el caso 3 y 4 sobrepasan el límite umbral señalado anteriormente, por cuanto sus valores no corresponden al fenómeno de explosión descrito como nube de vapor.

Paralelamente, el método Multi-Energía se ubica en un rango 10 veces menor para todos los casos analizados, que lo posiciona dentro de la magnitud posible del fenómeno de explosiones por nube de vapor, por cuanto esta metodología describiría de mejor forma el dimensionamiento de la sobrepresión a consecuencia de una explosión interior de una nube de propano. Sin embargo, la magnitud de la estimación puede estar sobredimensionado en virtud de la fuerza de origen propuesta, ya que se utilizó el valor máximo disponible (10) y que puede ser menor en función de un análisis más detallado del sistema. Lo anterior, podría desarrollar un dimensionamiento más ajustado a la realidad y que describa de mejor forma el fenómeno propuesto.

Cabe destacar que, a cortas distancias de evaluación, como lo señalado en la tabla 4-2, la comparación entre ambas metodologías se torna estéril, ya que los valores presentan orden de magnitud distintos. Solo es posible extrapolar que la dimensión de lo calculado por el método Multi-Energía es consecuente con la descripción cualitativa de los fenómenos explosivos descritos en la figura 1-1.

Los gráficos 4-1 a 4-4 muestran el comportamiento comparado entre ambos métodos, para cada recinto evaluado, donde se verifica que, en ningún espacio de la evaluación, los valores de sobrepresión convergen a un punto específico. Además, existe una evidente diferencia tanto a cortas distancias (próximas al centro de la explosión) como a distancias mayores, en la magnitud de la sobrepresión evaluada.

El modelo TNT equivalente mantiene una sobredimensión claro en todos los parámetros umbrales evaluados, respecto a la magnitud establecida por el método Multi-Energía. Lo anterior, determina que no son compatibles o complementarios en virtud del escenario de almacenamiento de aerosoles en bodega y los parámetros de cálculo ingresados al modelo.

Dadas las diferencias en los valores de sobrepresión calculadas, es posible determinar que el método TNT equivalente, se aleja de las condiciones de borde definidas para el fenómeno de sobrepresión identificadas en la figura 1-1 y descritas en el capítulo 3. Contrariamente, el método Multi-Energía describe un comportamiento más cercano a la realidad con valores que se ajustan a una explosión de nubes vapor.

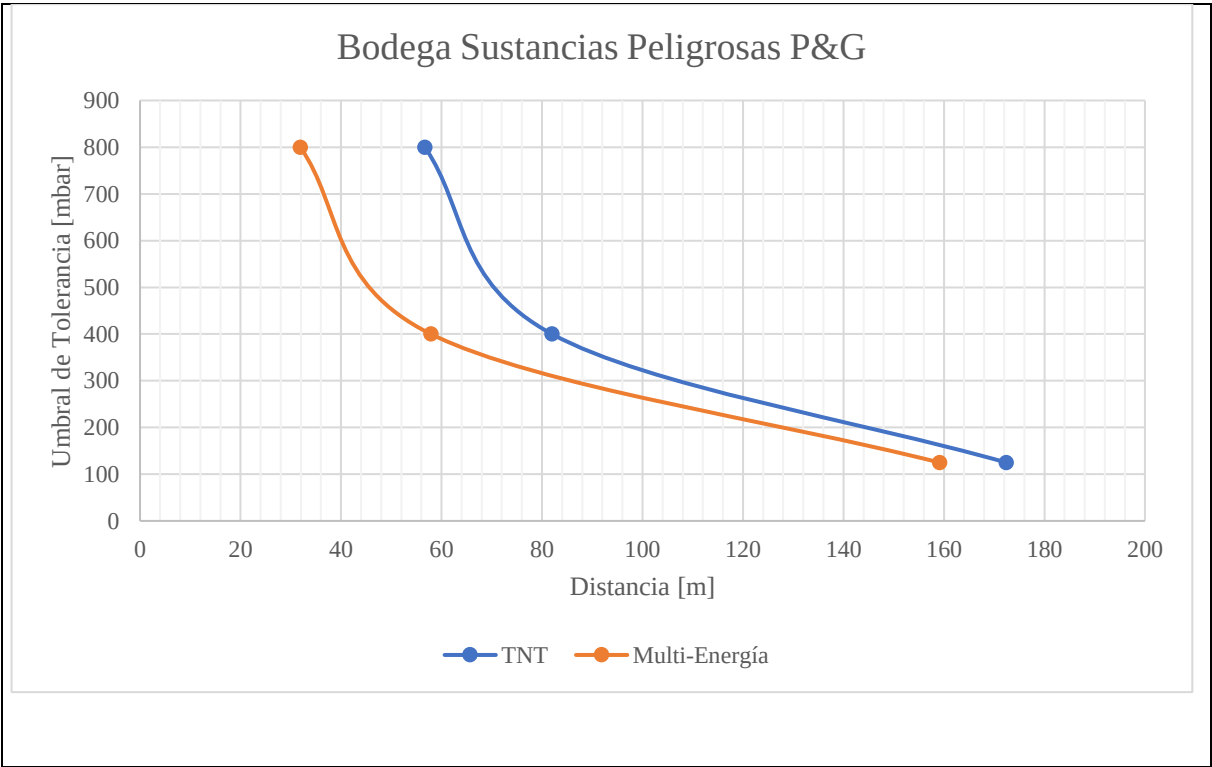


Gráfico 4-1:Distribución de sobrepresión en función de parámetros umbrales Recinto N°1

Fuente: Elaboración propia

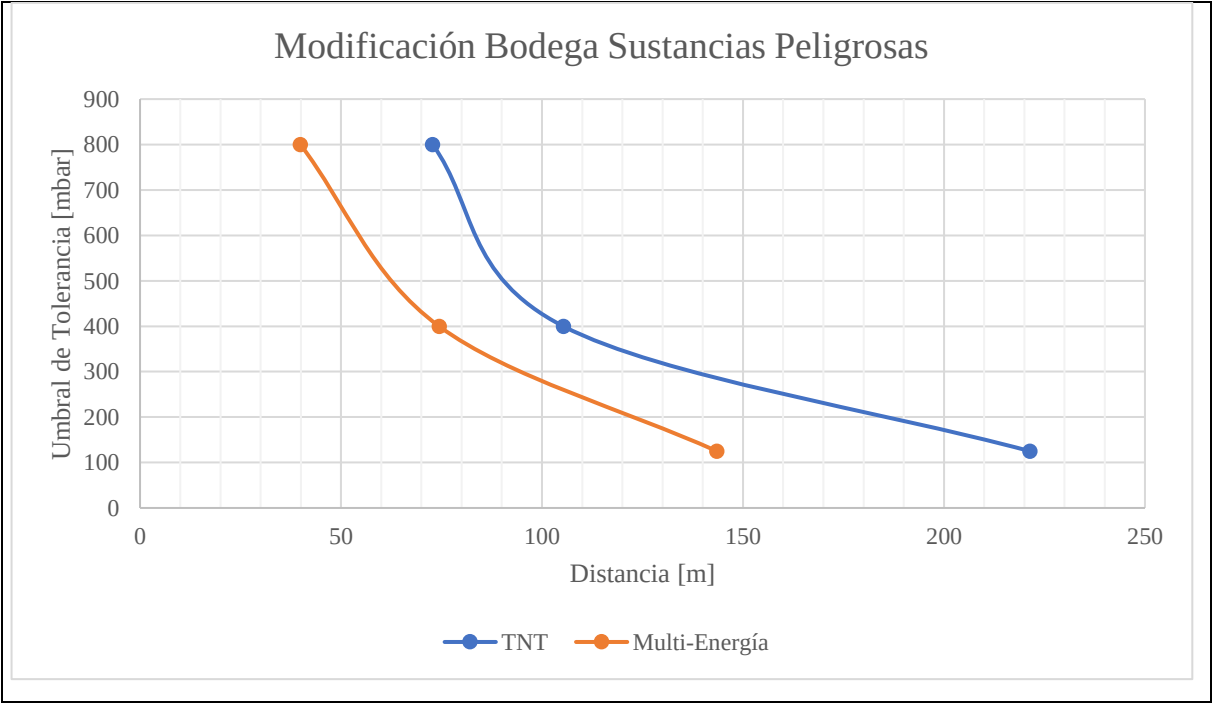


Gráfico 4-2:Distribución de sobrepresión en función de parámetros umbrales Recinto N°2

Fuente: Elaboración propia

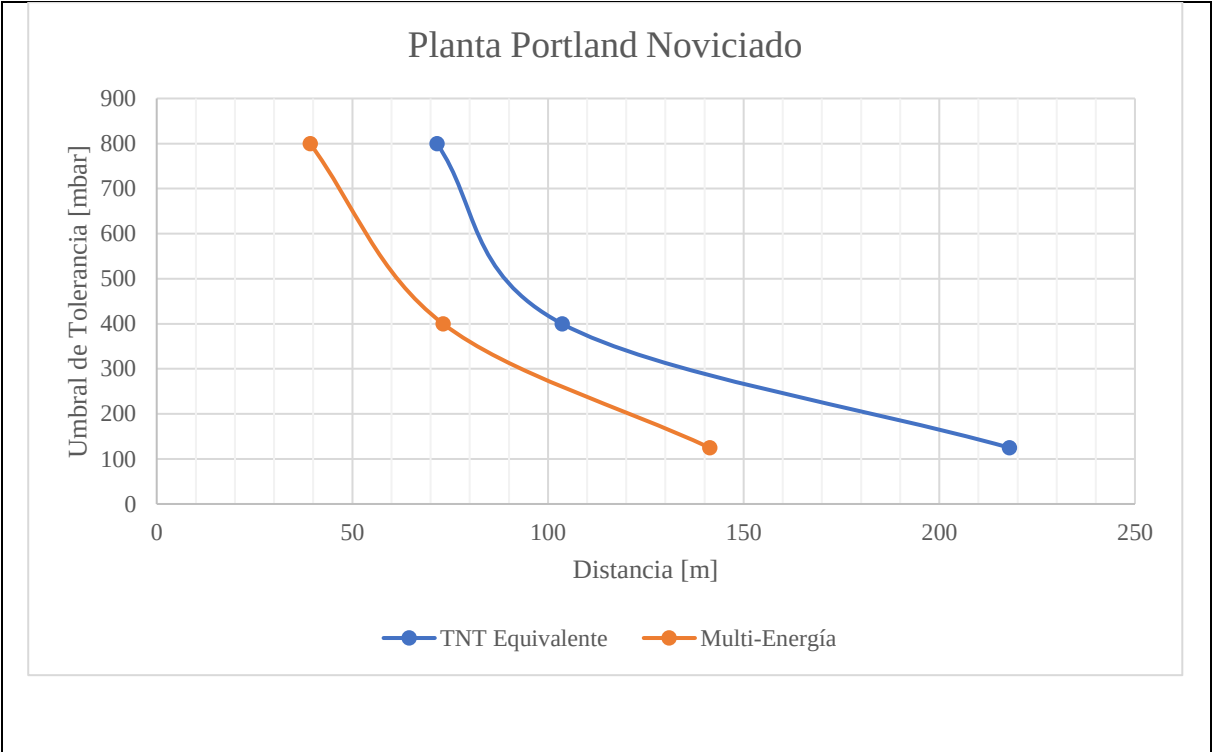


Gráfico 4-3:Distribución de sobrepresión en función de parámetros umbrales Recinto N°3

Fuente: Elaboración propia

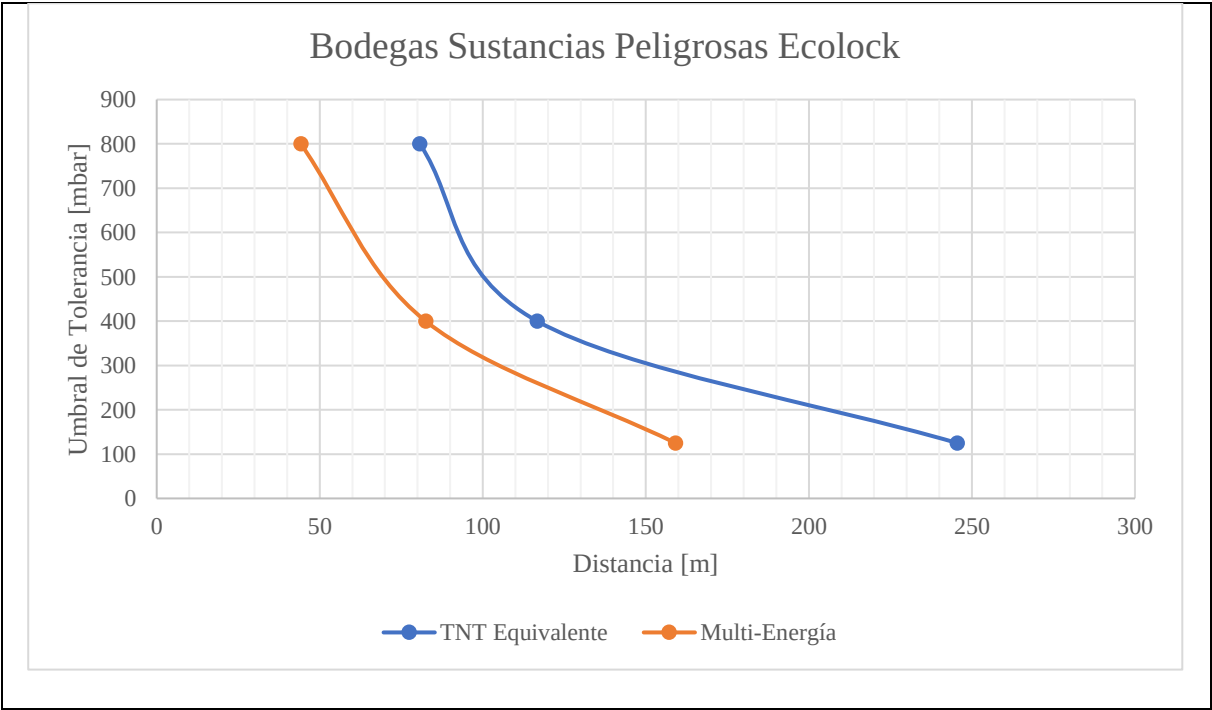


Gráfico 4-4:Distribución de sobrepresión en función de parámetros umbrales Recinto N°4

Fuente: Elaboración propia

Los datos proporcionados por (HSE, 2012) para un estudio específico de aerosoles en bodegas, establecen que un escenario posible (tamaño de la nube) contempla una explosión de una nube de vapor de 2 [ton] para una mezcla propano/butano sobre un almacenamiento de 50 [ton] mínimo. Cantidades superiores de material inflamable, requieren condiciones extremas de liberación con una menor probabilidad de ocurrencia.

La misma referencia estima que 2 [ton] de una mezcla propano/butano pueden tener un alcance de hasta 130 [m] para alcanzar el límite umbral de 130 [m].

Dicha mezcla (propano/butano) puede alcanzar una sobrepresión *peak*, superior al caso del propano puro estudiado, por cuanto los resultados guardan cierta correlación con los obtenidos en los recintos estudiados.

De la misma forma, el documento² establece que la sobrepresión máxima esperada para un escenario altamente energético no superará 1 [bar], incluso para distancias próximas al punto de origen. Los resultados presentados en la tabla 4-2 para el modelo TNT equivalente, superan considerablemente el límite propuesto por HSE para un escenario creíble de explosión por nube de vapor. Este punto es relevante, ya que no es posible construir una hipótesis de cálculo donde toda la masa disponible de propano tiene la capacidad para liberarse en forma instantánea desde los recipientes y generar una nube de vapor dentro del rango de explosividad. Dicho resultado es contrario a los criterios de cálculo establecidos por el MMARC, donde toda la masa de propano almacenada tiene la capacidad para producir una explosión.

De la misma forma, el modelo Multi-Energía se aproxima consistentemente a los parámetros umbrales determinados por HSE, salvo para los casos 3 y 4, dada la cantidad de aerosoles almacenada y la distancia objetiva en evaluación.

El recinto 2 presenta condiciones de interés adicionales, ya que pese a almacenar una cantidad superior al caso 1 y superiores al recinto 3, alcanza valores de sobrepresión inferiores al resto, tanto a cortas como a grandes distancias. Lo anterior, puede estar relacionado a la superficie de la bodega, la cual es superior a los otros 3 casos estudiados y que tendría una influencia sobre la capacidad de propagación de la onda de choque al interior del recinto. Este punto puede ser relevante para los aspectos de diseño, donde superficies más grandes, reducen el confinamiento de la nube y por ende limitan la velocidad de propagación.

4.1 Análisis de sensibilidad del modelo

Para determinar los efectos asociados a cada variable involucrada en la metodología TNT equivalente, utilizada por el Ministerio de Salud para la evaluación de efectos mecánicos sobre las personas e instalaciones, se desarrolló un análisis de sensibilidad sobre cada caso en estudio con el objetivo de determinar la variación de la distancia en [m] en función del umbral de tolerancia 800 [mbar]. En este contexto, se determinaron las siguientes variables dependientes:

² Risk Assessment for VCE scenario in an Aerosol Warehouse. Health and Safety Executive 2012. UK

- Tamaño de la nube (masa disponible para explosión)
- Rendimiento de la explosión

El tamaño de la nube se relaciona con la cantidad de propano disponible para una explosión, según las condiciones de almacenamiento en cada recinto (masa total declarada) y el rango de explosividad del propano, ya que no es posible un estallido fuera de estas condiciones de borde (LEL y UEL).

El rendimiento o eficiencia de la explosión, tal como se describió en el punto 2.1.2, corresponde a valores entre 1% a 10%, dependiendo del escenario a evaluar y la configuración de la explosión (tipología). El manual del MMARC del MINSAL define un criterio común para todas las evaluaciones, con un valor de 10%, mientras otras referencias adoptan valores entre 3% y 4% (Casal, Montiel, Planas, & Vílchez, 2001).

Las variables dependientes descritas, son utilizadas en la ecuación 2 para determinar la masa de TNT equivalente, que luego es utilizada para determinar el alcance, según la distancia normalizada. Otras variables como las condiciones ambientales no tienen un efecto real sobre la ecuación 2 y 3, por cuanto no son objeto de interés para el análisis de sensibilidad. Lo anterior es equivalente para el calor de combustión del TNT, el cual permanece constante.

El análisis de sensibilidad abordará las variables rendimiento y tamaño de la nube, para establecer la variación en el cálculo de la distancia, en función de la sobrepresión umbral. Las tablas 4-3 a la 4-6 muestran los valores calculados para cada recinto en evaluación.

Tabla 4-3: Análisis de sensibilidad bodega sustancias peligrosas P&G

		Rendimiento de la explosión					
		2%	4%	6%	8%	10%	
Masa para Sobrepresión [Kg]	3.638	33,1	41,8	47,8	52,6	56,7	Alcance [m]
	5.000	36,9	46,4	53,1	58,5	63,0	
	6.500	40,2	50,7	58,0	63,8	68,8	
	10.000	46,4	58,5	67,0	73,7	79,4	
	15.500	53,7	67,7	77,5	85,3	91,9	
	16.459	54,8	69,1	79,1	87,0	93,7	
		Umbral de tolerancia 800 [mbar]					

Tabla 4-4: Análisis de sensibilidad modificación bodega sustancias peligrosas

		Rendimiento de la explosión					Alcance [m]
		2%	4%	6%	8%	10%	
Masa para Sobrepresión [Kg]	7.707	42,6	53,6	61,4	67,6	72,8	
	10.000	46,4	58,5	67,0	73,7	79,4	
	17.500	55,9	70,5	80,7	88,8	95,7	
	25.000	63,0	79,4	90,9	100,0	107,8	
	32.500	68,8	86,6	99,2	109,2	117,6	
	34.865	70,4	88,7	101,5	111,8	120,4	
Umbral de tolerancia 800 [mbar]							

Tabla 4-5: Análisis de sensibilidad planta Portland Noviciado

		Rendimiento de la explosión					Alcance [m]
		2%	4%	6%	8%	10%	
Masa para Sobrepresión [Kg]	7.350	41,9	52,8	60,4	66,5	71,6	
	10.000	46,4	58,5	67,0	73,7	79,4	
	17.500	55,9	70,5	80,7	88,8	95,7	
	25.000	63,0	79,4	90,9	100,0	107,8	
	32.500	68,8	86,6	99,2	109,2	117,6	
	33.250	69,3	87,3	99,9	110,0	118,5	
Umbral de tolerancia 800 [mbar]							

Tabla 4-6: Análisis de sensibilidad bodega sustancias peligrosas Ecolock

		Rendimiento de la explosión					Alcance [m]
		2%	4%	6%	8%	10%	
Masa para Sobrepresión [Kg]	10.500	47,2	59,5	68,1	74,9	80,7	
	15.500	53,7	67,7	77,5	85,3	91,9	
	25.000	63,4	79,9	91,5	100,7	108,5	
	35.500	70,8	89,2	102,1	112,4	121,1	
	42.500	75,2	94,8	108,5	119,4	128,6	
	47.500	78,0	98,3	112,6	123,9	133,5	
Umbral de tolerancia 800 [mbar]							

Todos los escenarios modelados a partir del análisis de sensibilidad presentan variabilidad tanto por el rendimiento de la explosión como por el tamaño de la nube (masa para sobrepresión). Se evidencia una correlación específica que incrementa la distancia (alcance), tanto por efecto de la masa, como por efecto del rendimiento. Sin embargo, para una misma cantidad de masa, el efecto del rendimiento casi duplica (1,71) el alcance para el mismo umbral de tolerancia (800 [mbar]). Mientras que, la masa correspondiente a los límites LEL y UEL, sobre un mismo rendimiento, aumenta en un factor de 1,65. Por este motivo, se determina que la variable determinante en el caso del modelo TNT equivalente corresponde al rendimiento de la explosión.

Cabe destacar que los resultados descritos, no aplican a distancias próximas al punto de origen de la explosión, ya que tal como se verificó en el capítulo 4, los valores en esta zona para el modelo TNT equivalente sobrepasan las magnitudes descritas para el fenómeno de nube de vapor, por cuanto su evaluación solo tiene sentido en distancias superiores a 40 [m].

Específicamente para el caso de estudio 2, los datos derivados del análisis de sensibilidad fueron procesados en base a correlaciones numéricas simples, para determinar su comportamiento y estabilidad en función de las variables analizadas. El gráfico 4-5 muestra el comportamiento del gradiente o variación de distancia para cada masa utilizada, en función de la variación de rendimiento, mientras que la gráfica 4-6 indica la distribución del alcance en función del rendimiento para cada masa útil estimada.

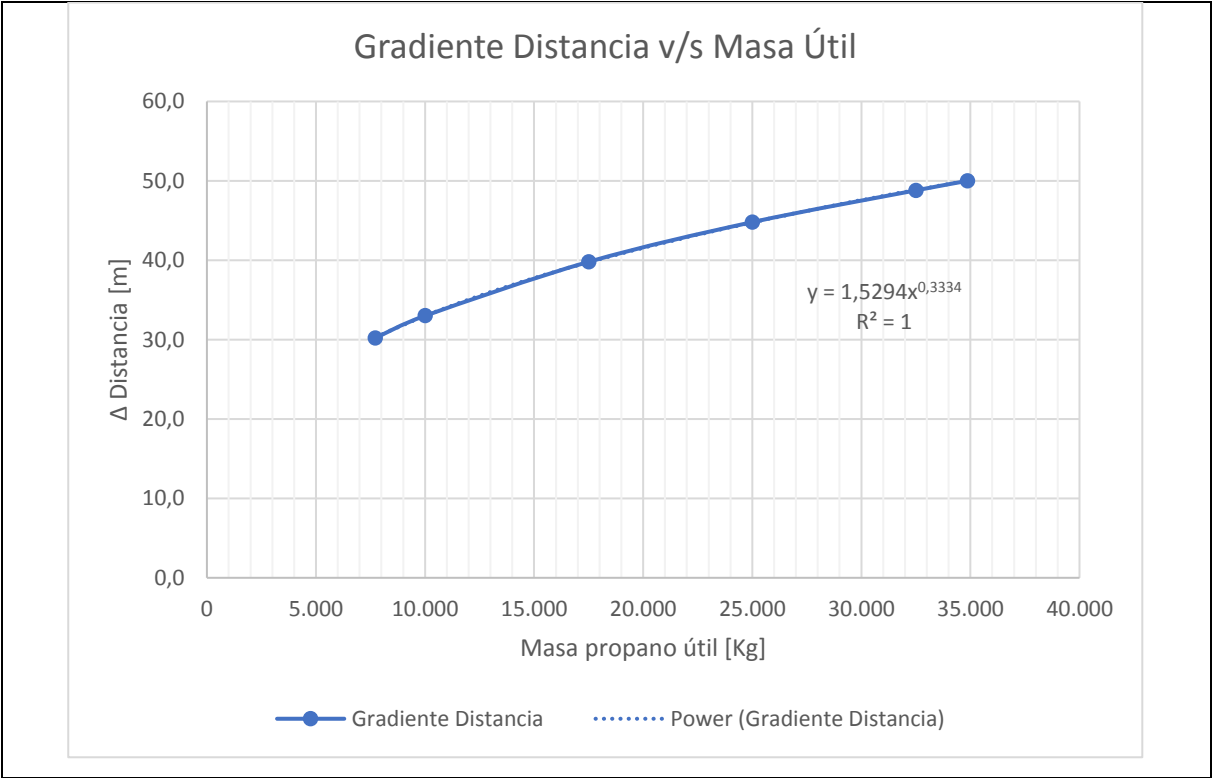


Gráfico 4-5:Gradiente de distancia máxima en función del rendimiento

Fuente: Elaboración propia

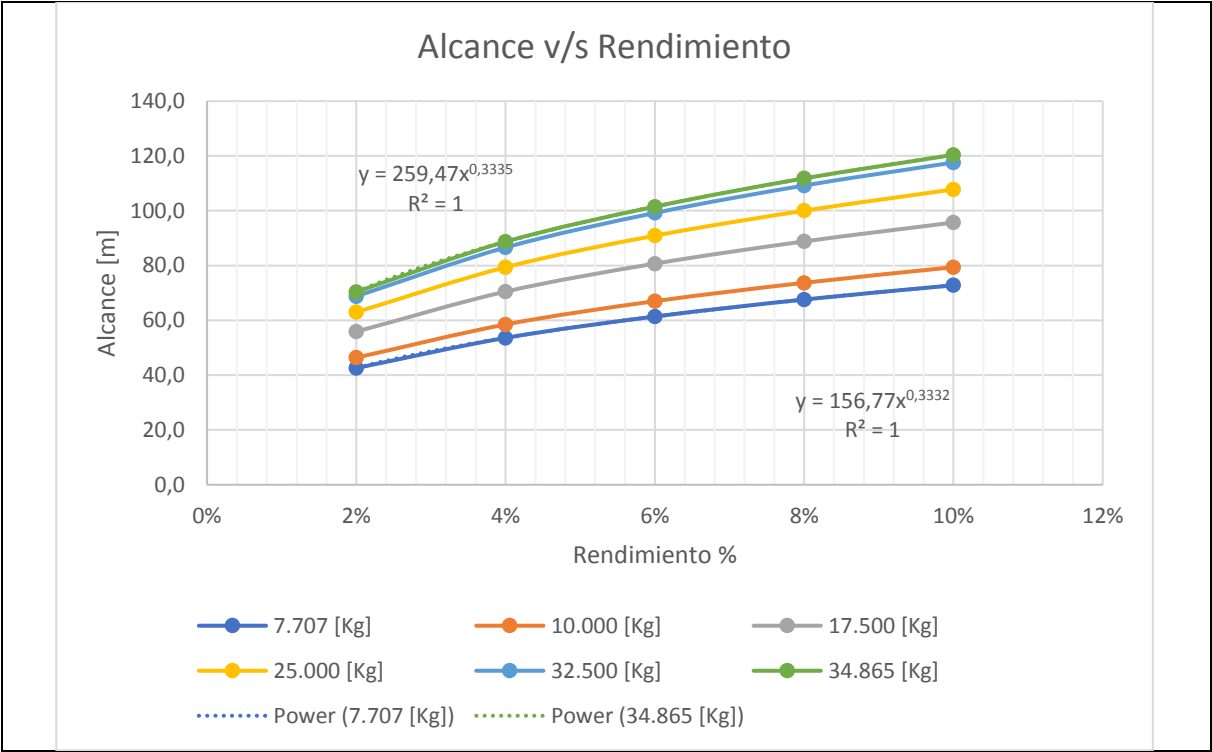


Gráfico 4-6: Distribución de alcance máximo en función del rendimiento

Fuente: Elaboración propia

El gráfico 4-5 configura un comportamiento definido y claro entre el gradiente de distancia máxima para el rango de rendimiento utilizado [2% - 10%], y la masa útil de propano. Se determinó una línea de tendencia del tipo no lineal con un coeficiente de correlación estadístico (R^2) igual a 1, que describe satisfactoriamente la variación de distancia en función del rendimiento. En este contexto, es posible evaluar cualquier posible distancia, sobre el rango de datos explorado y sería posible la elaboración de un modelo más preciso que describa un rango de datos más extenso.

Respecto al gráfico 4-6, se demuestra que para todos los tamaños de nube evaluados (masa) en función del rendimiento, el alcance máximo queda determinado por una línea de tendencia del tipo “potencial” con un coeficiente de correlación estadístico (R^2) igual a 1, que describe satisfactoriamente cada punto evaluado. Esto sugiere que el modelo TNT equivalente establece algún tipo de patrón homogéneo entre la masa utilizada y el rendimiento de la explosión para distancias superiores a 40 [m], medidos desde el centro de la explosión.

La variación del rendimiento sugiere un posible acoplamiento de los resultados obtenidos entre el modelo TNT equivalente y el modelo Multi-Energía para distancias superiores a 40 [m]. Por este motivo, se realizó un análisis complementario para verificar la existencia de este espacio teórico, donde ambas metodologías compartan valores comunes de sobrepresión en función de la distancia.

El caso número 2, fue evaluado según este criterio. La figura 5-7 sugiere un acoplamiento entre los valores de ambos métodos, para el umbral de tolerancia 800 [bar] cuando se utiliza un rendimiento de 1,65% para el método TNT equivalente. No obstante, este valor no logra el mismo efecto para los umbrales de tolerancia 400 [mbar] y 125 [mbar].

Siguiendo el mismo esquema, se determinó una segunda convergencia para el umbral 400 [mbar] cuando el rendimiento es equivalente a 3,50% y un tercer acoplamiento para el umbral 125 [mbar] sobre un rendimiento equivalente a 2,75%. De estos valores es posible extrapolar que metodológicamente, el rendimiento debería estar asociado al tipo de umbral de tolerancia que se requiere evaluar y no utilizar un rendimiento determinado, como criterio común para cualquier nivel de daño.

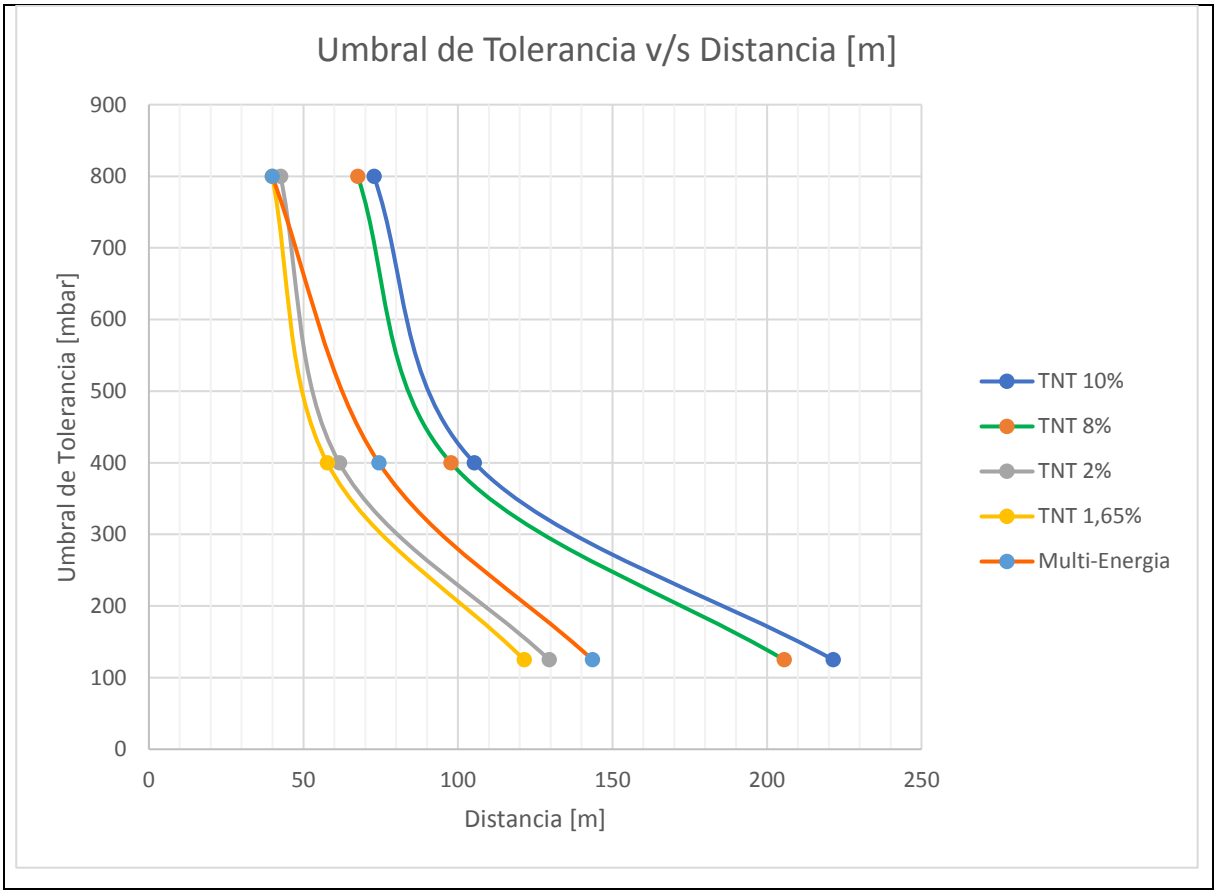


Gráfico 4-7: Distribución de distancia según rendimiento y umbral de tolerancia

Fuente: Elaboración propia

El análisis del gráfico 4-7 reveló que teóricamente es posible establecer una correlación entre ambos métodos, para determinar la distancia máxima sobre un determinado nivel de daño. El uso de diferentes rendimientos mantiene una coherencia fenomenológica, dado que a medida que la onda de choque se va alejando del centro de la explosión, va perdiendo energía y como resultado su efecto mecánico decae en función de la distancia. De esta forma, los umbrales de tolerancia se distribuyen longitudinalmente al punto de origen y no podrían verse afectados por el mismo rendimiento que se produce o estima existe en el centro de la explosión.

4.2 Interpretación física de los resultados

El análisis de resultados proporcionó evidencia teórica respecto al real alcance (distancia) de la sobrepresión generada durante la explosión según los parámetros umbrales de tolerancia definidos en el artículo 44 del Decreto N°43/2015 del MINSAL. Esto tiene un impacto a nivel industrial en la distribución y configuración de los emplazamientos, dado que actualmente, se requiere un análisis de consecuencias que determina a la distancia a la cual un recinto de las características evaluadas debe ubicarse tanto a otras instalaciones interiores, como al muro medianero (perimetral). La evaluación de los datos procesados establece que las distancias que actualmente propone el método TNT equivalente, son superiores a las que entrega el método Multi-Energía, lo que genera una distorsión desfavorable respecto a la ubicación de estos recintos y la distancia que deben mantener como espacio libre.

La figura 4-1 representa el comportamiento de las ondas de choque, respecto a los parámetros de tolerancia definidos y su respectiva distancia. El punto de origen, al interior de la bodega, queda representado como X_0 , mientras que la ubicación de la principal medida de mitigación (muro perimetral de la bodega) se ubica en la posición X_1 . La distancia X_2 representa la destrucción de otras construcciones, mientras que la posición X_3 expresa daños a las personas (no letales).

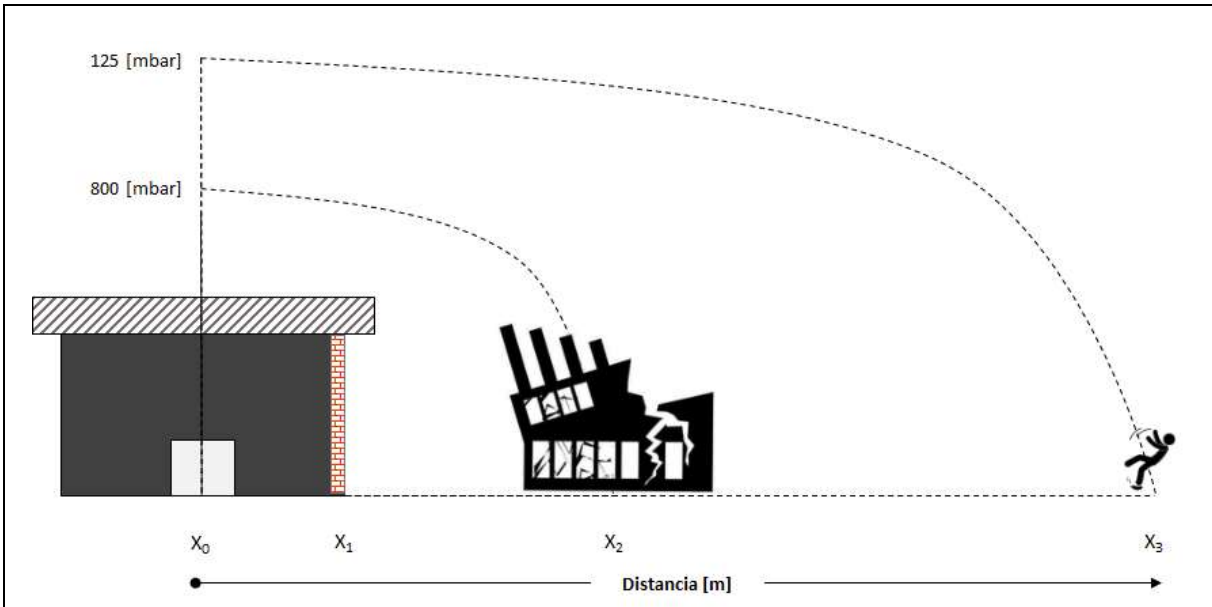


Figura 4-1: Distribución de onda de choque en función de la distancia y parámetros umbrales

Fuente: Elaboración propia

El problema de la metodología establecida por la autoridad nacional radica que en las distancias X_1 a X_3 son superiores a las que los modelos más ajustados a la realidad establecen como válidas. Esto tiene un impacto en el diseño de los recintos de almacenamiento, aumentando el espacio libre entre las bodegas de almacenamiento y otras construcciones.

Respecto a la ubicación del muro perimetral y la configuración interior de las bodegas (X_2), la normativa vigente solo establece que debe existir una distancia mínima de 1,5 [m] libres, lo que, de acuerdo a los cálculos analizados, no es una medida suficiente para evitar la destrucción de la protección pasiva, en el caso de que el punto de origen de la explosión sea próximo a este elemento.

La constitución exigida del muro perimetral, tipo G-40, tampoco asegura o garantiza la integridad estructural del edificio frente a una explosión catastrófica, dado que este elemento constructivo no tiene buena resistencia a esfuerzos radiales ni tampoco, por sus propiedades de elasticidad, permite derivar la onda de choque. Por este motivo, se requieren introducir acciones o medidas de diseño que protejan el muro expuesto a una mayor tolerancia o que requiera absorber un mayor esfuerzo radial en beneficio de la protección de otras instalaciones o personas que se ubican de manera adyacente al edificio.

En referencia a los elementos de diseño, se observó que el recinto del caso 2 presenta una mejor distribución de la onda de choque, pese a almacenar casi la misma cantidad que el caso 3. Esto se debe a que la superficie del recinto 2 es considerablemente mayor, por cuanto la distancia entre la ubicación probable del punto de origen respecto al muro medianero es mayor.

Otro aspecto no considerado en la normativa legal vigente, corresponde a la ubicación y materialidad de las puertas de acceso a los recintos de almacenamiento, ya que ofrecen un punto de fuga para la onda de choque, en caso de que el incidente se produzca durante la operación normal del recinto. Por este motivo, es relevante orientar su ubicación, en beneficio de reducir el impacto hacia otras instalaciones industriales o personas adyacentes al recinto, junto con disponer de materiales que otorguen condiciones de tolerancia equivalentes al muro perimetral seleccionado.

4.3 Interpretación económica de los resultados

De los antecedentes disponibles en el capítulo 3 es posible extrapolar el valor en [UF/m²] que corresponde a una bodega exclusiva para sustancias inflamables del tipo separada. Los montos de inversión analizados corresponden al 31% del total de proyectos aprobados entre el año 2010 y 2018 y representan a los de mayor, frente al resto de sustancias peligrosas almacenadas. Lo anterior se debe principalmente, al costo de las medidas de protección pasiva y activa, establecidas en el Decreto N°43/2015 del MINSAL para este tipo de recintos. La tabla 4-7 establece el valor en UF por metro cuadrado de las 4 bodegas, según la información presentada en la tabla 3-1.

Tabla 4-7: Costo de inversión en UF por metro cuadrado recintos en evaluación

N°	Nombre	Región	Inversión (MM US\$)	Superficie [m²]	Costo [UF/m²]
1	Bodega de sustancias peligrosas – (P&G)	RM	0,3659	282	31
2	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	RM	4,0000	4.055	24
3	Planta de almacenamiento de productos químicos – (Portland Noviciado)	RM	60,0000	1.386	33
4	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas - (Ecolock)	RM	16,0000	1.403	35
Nota 1: Valor UF \$27.566 19-03-2019					
Nota 2: Valor del dólar observado \$667 19-03-2019					

Fuente: Banco Central de Chile

De los cuatro proyectos de inversión, el costo que representa el sistema de protección pasivo, correspondiente a la materialidad y construcción de la bodega, es aproximadamente el 70% del valor total por metro cuadrado. Las medidas de protección activa, correspondientes al sistema de detección y extinción automática contra incendios, es cercano al 20% del valor restante. Ambos elementos corresponden al 90% del monto total por bodega, por cuanto cualquier reducción u optimización en su configuración, tendrá un impacto a la baja sobre el costo de inversión.

En una escala conceptual, es posible concluir que existen materiales capaces de tolerar una sobrepresión máxima de 500 [mbar], como el ladrillo reforzado y que bajo un nuevo modelo de cálculo podrían ser una alternativa en términos de resistencia mecánica y térmica para los recintos analizados.

En el caso de paneles compuestos de múltiples capas, resistentes al fuego y con alta capacidad de tracción (explosión) es posible inferir que existen alternativas o soluciones constructivas que satisfacen los requisitos de tolerancia térmica y mecánica establecidos por el Decreto N°43/2015 del MINSAL.

Esta conclusión cataliza la posibilidad de extender la tipología de materiales de construcción para bodegas de almacenamiento de aerosoles a paneles modulares con resistencia a umbrales de tolerancia no superiores a los 700 [mbar], con un costo de inversión mucho menor al que actualmente configuran los muros de hormigón armado tipo G-40.

De acuerdo con los datos proporcionados por la tabla 4-7, los recintos de hormigón tipo G-40 mantienen un costo promedio de 30 [UF/m²], mientras que estimaciones preliminares proyectan un valor de entre 12 a 15 [UF/m²] con el uso de paneles modulares con resistencia hasta 700 [mbar]. En términos objetivos, esto corresponde a una reducción cercana al 50% del costo estimado para un recinto con una superficie de aproximadamente 1.000 [m²] y 700 [ton] de almacenamiento para aerosoles.

Lamentablemente no existen normas de referencia técnica ni ensayos experimentales a nivel nacional, que validen estas estimaciones o bien que generen un listado de materiales resistentes a determinadas cargas de sobrepresión, por cuanto no es posible cuantificar de manera objetiva el aporte de los muros o paneles compuestos para este tipo de recintos.

Del ejercicio anterior, solo es posible extrapolar que existe la posibilidad de reducir al menos un 50% el costo de inversión en lo que respecta a los muros perimetrales y resistencia mecánica del recinto para almacenamiento de aerosoles. Por lo tanto, es necesario un análisis más detallado para determinar el alcance real, en términos de costos de inversión, de las soluciones constructivas propuestas, que cumplan tanto las expectativas financieras, como las medidas de protección a las personas y el medio ambiente.

4.4 Optimización de parámetros y modelos de cálculo

Vistos los resultados obtenidos por el método TNT equivalente y concluidas sus imprecisiones en la evaluación de sobrepresión a cortas distancias, se hace necesario promover el análisis de parámetros umbrales bajo la metodología Multi-Energía, que demostró un mejor comportamiento en términos de cálculo y aproximación del fenómeno estudiado. De esta forma, es posible incorporar a los análisis de consecuencias el desarrollo de isolíneas para impulso y sobrepresión, que permiten modelar con mayor precisión los posibles efectos sobre las personas y materiales de construcción, tanto del recinto de almacenamiento, como aquellos adyacentes o cercanos a la bodega. El cambio de modelo y la incorporación en el análisis de variables más específicas debe ser liderado por la autoridad competente, en este caso el Ministerio de Salud, con el objetivo de no sobredimensionar los escenarios de cálculo y ajustarlos a las condiciones de almacenamiento que requiere la industria actual. La propuesta del cambio en el modelo actual de estimación de sobrepresión se fundamenta en la necesidad de disponer de un dimensionamiento real de las consecuencias sobre el diseño propuesto, las personas, el medio ambiente e instalaciones adyacentes.

Tal como se verificó, una solución transitoria podría ser el ajuste del parámetro rendimiento de la explosión, para modelar una deflagración a diferencia de una detonación para el almacenamiento en bodega. No obstante, esta modificación solo tiene un impacto a distancias sobre 40 [m], por cuanto serviría para analizar principalmente los efectos sobre otras instalaciones.

De la misma forma, es posible ajustar el tamaño de la nube (propano), utilizando el rango de explosividad del propano que limita la condición de borde necesaria para producir un estallido. Actualmente el MMARC no contempla dicho ajuste y debe ser incorporado en los análisis de consecuencias futuros.

Ambas recomendaciones solo permiten abordar la evaluación de consecuencias a grandes distancias y no solucionan el problema de resistencia de los muros perimetrales de la bodega, por cuanto, específicamente para este punto, solo cabe un cambio en la metodología de cálculo.

4.5 Mejoras en las condiciones de diseño y operación de las bodegas

Respecto a las condiciones de diseño de las bodegas, cabe señalar que las sobrepresiones estimadas por el método TNT equivalente a cortas distancias, superan el límite de tolerancia de los muros tipo G-40, por cuanto se concluye que las condiciones de resistencia deben ser mejoradas. Adicionalmente, los recintos con muros de hormigón de armado y tolerancia G-40, tienen un costo de construcción elevado, por cuanto se ha promovido una solución no solo ineficiente, sino además de alto costo.

En este sentido, se recomienda incorporar materiales de construcción diseñados específicamente para tolerar, mitigar y proteger la estructura del recinto, permitiendo distribuir la carga radial de sobrepresión. Actualmente existen diversos paneles especiales, con un rango de tolerancia entre 0,3 y 2,3 [bar] que permiten proteger una estructura metálica o de hormigón frente a un estallido al interior de la bodega. Lo anterior, puede complementarse con la habilitación de un muro compuesto, que brinde protección frente a explosiones y alta resistencia al fuego (RF-180 o superior). La figura 4-2 muestra un panel comercial, resistente a explosiones de hasta 2,3 [bar] (2.300 [mbar]) y 6 horas de exposición al fuego. Contemplan dos placas de metal unidas mecánicamente a un núcleo de hormigón reforzado con fibra, que requieren muy poco mantenimiento, una vez instalado.



Figura 4-2: Panel para explosiones galvanizado

Fuente: DuraSystems

El panel mostrado en la figura 6-1 corresponde a una medida de protección pasiva que puede tolerar eficientemente los escenarios dimensionados en la etapa de cálculo, aportando resistencia a una estructura de hormigón, incluso de menor composición (G-10 o G-20). Un análisis más profundo de materiales podría recomendar que este tipo de paneles sea utilizado sobre una estructura metálica o bien paneles con alta resistencia al fuego, desarrollando un módulo de alta eficiencia y menor costo de construcción.

En la misma línea, ha sido desarrollada una tecnología complementaria de protección pasiva en base a una cobertura de poliuretano, aplicada como aerosol, con el objetivo de proteger estructuras, paneles o muros, frente a explosiones y fuego. La empresa “*Line-X*” desarrolló exitosamente el producto “*Paxcon*” para la mitigación de estallidos en aplicaciones militares.

Estas alternativas de construcción pueden ser evaluadas según el diseño propuesto por arquitectura, hasta obtener la resolución técnica/económica más conveniente, sin afectar los niveles de seguridad que requieren los recintos evaluados. Este enfoque, puede además administrar de mejor forma, el resguardo necesario sobre otras instalaciones adyacentes o el límite perimetral de la propiedad, dado que se podría reforzar solo aquellos muros o caras que se orientan hacia recintos vulnerables, privilegiando las medidas especiales de protección pasiva sobre aquellos puntos realmente necesarios.

La tabla 4-8 propone una serie de controles de ingeniería tendientes a prevenir y mitigar eventuales incidentes con capacidad de expresar fallas catastróficas al interior de las bodegas de almacenamiento para aerosoles. Algunos de ellos corresponden a mejoras en el diseño de los recintos, que actualmente no son contemplados en el Decreto N°43/2015 del MINSAL y que podrían ser compilados en un instructivo específico, que establezca claramente las condiciones mínimas de seguridad al interior de estas instalaciones.

Adicionalmente, se recomiendan una serie de controles administrativos, con el objetivo de prevenir fallas durante la operación de las bodegas, capaces de iniciar una cadena de eventos iniciadores, intermedios y catastróficos.

Tabla 4-8: Controles y medidas recomendadas para los recintos de almacenamiento de aerosoles

Controles de ingeniería	• Limitar la capacidad de almacenamiento de aerosoles a 1.000 [ton] • El recinto deberá proveer resistencia estructural frente a amenazas (incendios en instalaciones adyacentes, incendios forestales, otros) • El sistema de ventilación deberá garantizar una atmósfera ausente de vapores o gases inflamables. • Sistemas de protección automáticos contra incendios que faciliten una rápida cobertura de la superficie de la bodega separando físicamente los vapores de las fuentes de ignición. (ver página 81). • Disponer de una distancia mínima de 3 [m] entre los racks de almacenamiento y los muros perimetrales de la bodega. • Habilitar medidas de protección para prevenir choques entre grúas horquillas y niveles racks de almacenamiento (ver figura 6-2).
Controles administrativos	• Preferir almacenamiento en niveles inferiores. • Eliminar materiales combustibles cercanos al sitio de almacenamiento para prevenir igniciones y posibles propagaciones externas. • No almacenar aerosoles junto a otros combustibles. En caso de ser necesario, se recomienda disponer de una separación física entre ellos (muro cortafuegos). • Todos los aerosoles deben estar consolidados en cajas y envases cerrados. • Disponer de señalética que limite las vías de acceso y tránsito de grúas horquillas. • Programas de prevención y manejo seguro para los operadores. • Procedimientos de trabajo seguro. • Planes de emergencia específicos para bodegas de aerosoles.
Equipos de protección personal	• Máscara de media cara con respirador para vapores orgánicos y gases ácidos inorgánicos. • Overol de tela antiestática. • Guantes de protección antiestático.

Fuente: (HSE, 2012)



Figura 4-3: Sistema de protección pasiva para racks

Fuente: Stow-Group

La figura 4-10 muestra dispositivos de protección pasiva para el acceso de la grúa horquilla a los diferentes niveles de almacenamiento. Se considera a los accidentes vehiculares interiores como un evento iniciador con potencial para expresar un incendio, liberación de propelente y explosión, por cuanto es necesario la protección del rack en todo su perímetro (contorno). Adicionalmente, se recomienda la disposición de señalética que restrinja la velocidad al interior de la bodega, capacitación de los operadores, mantenimiento de las grúas horquillas, planes de vigilancia sobre los conductores, entre otros.

Respecto a los sistemas de protección contra incendios, se recomienda un sistema de extinción automática en base a espuma de alta expansión, aplicado desde la parte superior del recinto. Este sistema permite la inundación total del recinto en base a los siguientes mecanismos de acción:

- Rápido enfriamiento.
- La generación de vapor de agua, por acción de la espuma y el material en combustión, reduce la concentración de oxígeno para mantener la combustión.
- El aislamiento de las superficies calientes restringe que estas propaguen el fuego hacia otras áreas.
- Previene la generación de gases inflamables.
- Utiliza una menor cantidad de agua, por cuanto se espera una reducción significativa de los efectos colaterales asociados a este agente extintor.
- Requiere una baja presión de operación.
- Tiene la capacidad para extinguir fuegos en geometrías horizontales y verticales.

- Restringe el movimiento vertical descendente de vapores y gases inflamables, al desarrollar una densa capa de burbujas (espuma).

Este último punto es mostrado en la figura 4-11, donde se aprecia la altura de la columna de burbujas, aplicada sobre la superficie de la bodega. Esta acción facilita la separación física entre el gas (propano) y las posibles fuentes de ignición, junto con restringir sus movimientos verticales y horizontales.

La figura 4-12 muestra la ubicación de las toberas generadores de espuma de alta expansión, en la parte superior del recinto. Esto facilita la descarga y distribución uniforme del agente extintor en forma circular hasta completar la inundación total de la bodega. El patrón de llenado, caudal de desalojo y condiciones de operación es configurado durante el proceso de ingeniería contra incendios, para determinar el número total de generadores y su ubicación respecto a la disposición de los racks para almacenamiento.



Figura 4-4: Inundación total interior por espuma de alta expansión

Fuente: skum.com



Figura 4-5: Ubicación de las toberas generadores y patrón de llenado circular

Fuente: skum.com

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los antecedentes presentados permite concluir que la evaluación de consecuencias para efectos mecánicos en recintos de almacenamiento para aerosoles, puede evolucionar a criterios y métodos de cálculo más eficientes y realistas, que permitan una comprensión más cercana a la realidad del fenómeno relacionado con las explosiones. Se evidenció la existencia de interferencias en el modelo presentado por el Ministerio de Salud, las que distorsionan la magnitud de la sobrepresión y su impacto sobre las estructuras de las bodegas.

En referencia a las variables críticas que afectan el cálculo de sobrepresión, se determinó que el rendimiento de la explosión y la masa total detonable, constituyen los parámetros de mayor influencia en modelo del TNT equivalente. En relación a este punto, las dos variables claves expresan las siguientes conclusiones:

- Rendimiento de la explosión: Tal como se explicó más arriba, esta variable corresponde a una aproximación que ingresa al modelo para establecer la eficiencia del estallido en función del fenómeno que se requiere calcular. Sin embargo, diferentes autores ofrecen criterios dispares para estimar su valor, lo que modifica su certeza, entregando una variabilidad poco eficiente para precisar efectos mecánicos a corta y larga distancia.
- Tamaño de la nube: Si bien en todos los casos fue posible dimensionar la cantidad de aerosol almacenada, determinar la cantidad de propano mediante las hojas de seguridad y establecer la masa total necesaria con su respectivo rango de explosividad, es necesario incorporar variables adicionales que ajusten el escenario de cálculo a situaciones de mayor probabilidad de ocurrencia, ya que para llegar al límite inferior de explosividad (LEL) se requiere una liberación simultánea de aerosol, que no se combustione y que tenga la capacidad de formar una nube. Esta secuencia de eventos determina que las condiciones reales necesarias para producir una explosión tendrán una baja probabilidad de ocurrencia. Por este motivo, es recomendable ajustar la cantidad de masa o tamaño de la nube a partir de datos experimentales o análisis histórico de casos, que pueden configurar un escenario más cercano a la realidad y no sobredimensionado como el establecido por el MMARC.

Ignorar estos elementos, determina la configuración de escenarios ficticios y fuera del comportamiento esperado para el fenómeno de estallido al interior de bodegas para aerosoles.

Respecto a los modelos analizados para la estimación de sobrepresión máxima, se concluye que el TNT equivalente presenta valores fuera del rango correspondiente a las explosiones por nube de vapor, particularmente a distancias de evaluación inferiores a 40 [m]. Dicho método entrega resultados que corresponden a explosivos de fase condensada y que no se correlacionan con el fenómeno particular del propano liberado desde envases de aerosoles. Esta conclusión es consecuente con las referencias consultadas donde se establece que el TNT equivalente, solo puede ser utilizado para la evaluación de sobrepresión a distancias superiores a 10 veces el tamaño de la nube, por cuanto no está recomendado su uso para el análisis a corta distancia, cercanas al punto de origen. Lo anterior sugiere que el método seleccionado por el Ministerio de Salud para la evaluación de efectos mecánicos no es útil para determinar la resistencia y materialidad de los muros perimetrales de las bodegas de almacenamiento de aerosoles y solo podría tener una aproximación razonable en fenómenos de nubes de vapor no confinadas (en el exterior) a una distancia superior a 10 veces el tamaño de la nube. Por cuanto se concluye que el método establecido por la autoridad no representa adecuadamente el fenómeno analizado, ni cuenta con la robustez necesaria para evaluar estructuras a corta distancia.

El análisis de respuesta estructural de la bodega y los muros perimetrales que la componen requiere una dimensión más profunda que la actualmente disponible, donde solo se limita a exigir la construcción de muros tipo G-40 en recintos que almacenan sobre 350 [ton]. De esta forma, se concluye la necesidad de contar con análisis más detallados que incorporen la geometría del recinto, su configuración interior y materialidad, conforme a las pautas del *Green Book*, capítulo 2 *The consequences of explosion effects on structures*.

Recomendaciones

Los resultados obtenidos permiten configurar dos tipos de recomendaciones. La primera tendiente a optimizar los parámetros y modelos utilizados para el cálculo de sobrepresión, mientras que la segunda enfocada en las condiciones de diseño y seguridad de las bodegas para aerosoles. Esta última adquiere una especial relevancia, ya que el objetivo final de los modelos y estimaciones de sobrepresión para efectos mecánicos se fundamenta en la reducción del riesgo sobre las personas y el medio ambiente, con diseños que contemplen medidas de protección pasiva y activa efectivas, orientadas tanto en la reducción de la probabilidad de ocurrencia de incidentes como el estudiado, como su impacto sobre la continuidad de negocio y pérdidas económicas para el sector industrial.

Respecto a los modelos numéricos utilizados, destacan las siguientes conclusiones:

- Los valores de sobrepresión obtenidos mediante el TNT equivalente, a distancias inferiores a 20 [m] superan los 15 [bar], lo cual no corresponde al fenómeno evaluado según las referencias consultadas. Muros de hormigón armado tipo G-40 no resisten las sobrepresiones a corta distancia estimadas por el método TNT equivalente.
- Se verificó que la distancia calculada en ambos métodos, para los valores límite umbral de sobrepresión, no se acoplaron en ninguno de los casos estudiados, según la calibración y ajuste de cada modelo. No obstante, se verificó que la variación del rendimiento de la explosión tiene la capacidad de modificar los valores obtenidos por el TNT equivalente y acoplarlos a los resultados del modelo Multi-Energía. Esta correlación es distinta para cada umbral de tolerancia seleccionado y tiene valores de 1,65% para 800 [mbar], 3,50% para 400 [mbar] y 2,75% para 125 [mbar].
- La variación del rendimiento en el método TNT equivalente es consecuente con la definición del método, cuando se refiere a que el valor utilizado inicialmente (10%) describe una explosión del tipo detonación, mientras que las referencias consultadas sugieren que al interior de una bodega que almacena aerosoles se debería producir una deflagración. Por consiguiente, el valor utilizado debería ser inferior a 10% para ajustar la magnitud de la distancia en función de la sobrepresión, conforme a los valores estimados en el punto anterior.
- Los parámetros calculados deben ser verificados experimentalmente, por cuanto solo constituyen un alcance matemático relacionado a un posible acoplamiento entre ambos métodos.
- Aún en el caso de acoplamiento entre el TNT equivalente y el modelo Multi-Energía, el análisis a corta distancia no tiene coherencia. Por cuanto solo podría ser utilizado en longitudes superiores a 40 [m], según los casos estudiados.

Orientaciones para futuros trabajo

Los antecedentes recopilados permiten orientar una serie de trabajos futuros que pueden ser abordados a nivel académico, con el objetivo de mejorar la comprensión del fenómeno de explosión a nivel local y promover prácticas de ingeniería pertinentes a las condiciones de riesgo que representan las bodegas de almacenamiento de sustancias inflamables.

En este contexto se destacan las siguientes oportunidades:

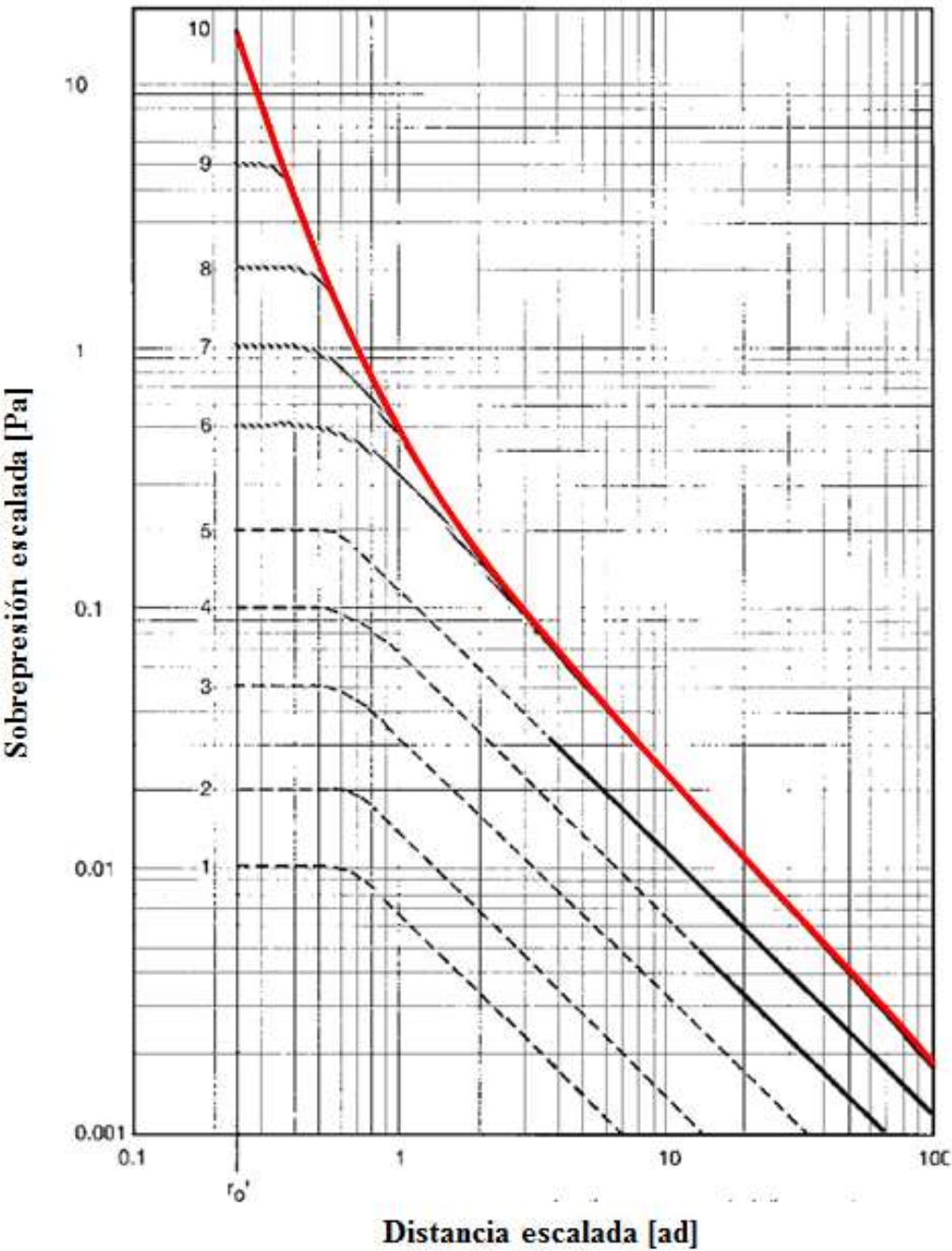
- Medición experimental de la sobrepresión, a escala de laboratorio con diseños aplicados en Chile y bajo condiciones de atmósfera controlada.
- Establecer correlaciones numéricas que permitan definir si los modelos TNT equivalente y Multi-Energía tienen capacidad de acoplamiento.
- Desarrollar o reproducir modelos numéricos que evalúen la respuesta estructural de una bodega, frente al efecto de ondas de choque de baja y alta energía.
- Utilizar modelos computarizados para dinámica de fluidos o CFD con capacidad de reproducir múltiples algoritmos de cálculo que permitan visualizar un modelo 3D de la onda de choque y sus efectos sobre las estructuras.
- Estudiar la respuesta estructural de diferentes composiciones modulares o paneles disponibles en el mercado nacional y evaluar su resistencia a efectos mecánicos causados por explosiones.
- Elaborar normas técnicas de alcance nacional que certifiquen la resistencia mecánica de muros o paneles compuestos para la construcción de recintos para el almacenamiento de aerosoles y otras sustancias peligrosas susceptibles de generar escenarios de explosión.
- Determinar los beneficios económicos que proyectan el uso de materiales modulares o paneles compuestos, como solución constructiva a los recintos para el almacenamiento de sustancias peligrosas.

BIBLIOGRAFÍA

- Atkinson, G. (2007). *Review of risks from fires in large aerosol stores*. FR: Health Safety Laboratory.
- Brode, H. L. (1959). Blast Wave from a Spherical Charge. *The Physics of Fluids* , 217.
- Casal, J., Montiel, H., Planas, E., & Vílchez, J. A. (2001). *Análisis del Riesgo en Instalaciones Industriales*. Barcelona: Alfaomega.
- Drysdale, D. (2009). *An Introduction to Fire Dynamics*. Edinburgh: Wiley.
- FEMA. (2003). *Reference Manual to Mitigate Potential Terrorist Attacks Against Buildings*. FEMA 426.
- Fontenia, S. G. (2012). *Explosión de Equipos a Presión. Análisis de Riesgos y Consecuencias*. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- HSE. (2012). *Risk Assessment for VCE scenario in an Aerosol Warehouse*. Derbyshire: Health and Safety Executive.
- Mihailidou, E. K., Antoniadis, K. D., & Asael, M. J. (2012). The 319 Major Industrial Accidents Since 1917. *Internataional Review of Chemical Engineering I.RE.CH.E*, 12.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2017). *Política Nacional de Seguridad Química*. Obtenido de Gestión de Sustancias Químicas de Uso Industrial: <https://sqi.mma.gob.cl>
- Ministerio de Salud. (2016). *Manual de Métodos de Análisis de Riesgos y Consecuencias*. Santiago: Ministerio de Salud.
- NFPA. (2008). Explosions. In P. Arthur E. Cote, *Fire Protection Handbook* (pp. 270 - 283). Quincy: National Fire Protection Association.
- OECD. (2003). *Emerging Risks in the 21st Century*. Paris: OECD Publications Service.
- TNO. (1992). Chapter 2 The consequences of explosion effects on structures. En T. N. Research, *Methods for the determination of possible damage*. The Hague: TNO.
- TNO. (2005). Chapter 5 Vapor Cloud Explosion. En T. N. Research, *Methods for the calculation of physical effects* (págs. 493-502). The Hague: TNO.
- TNO. (2005). *Methods for the calculation of physical effects "Yellow Book" CPR 14E*. The Hague: The Netherlands Organization of Applied Scientific Research.
- Zebetakis, M. (1965). *Flammability characteristics of combustible gases and vapours*. Pittsburg, PA: US Bureau of Mines.

ANEXOS

Anexo 1: Gráfico sobrepresión v/s distancia escalada Multi-Energía



Anexo 2: Proyectos de sustancias peligrosas evaluados en el SEA

N°	Nombre	Región	Tipología	Clase Riesgo	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación
1	Habilitación bodega productos peligrosos	RM	ñ4	Inflamable	0,1750	16-oct-2018
2	Ampliación de capacidad de almacenamiento y fabricación de fertilizantes para la agricultura	RM	ñ1	No Inflamable	4,0000	2-oct-2018
3	Bodegas multipropósito malvilla	Quinta	ñ1	No Inflamable	0,0500	19-jul-2018
4	Ampliación capacidad de almacenamiento ácido clorhídrico	Octava	ñ4	No Inflamable	0,4000	12-jul-2018
5	Losa de almacenamiento de contenedores con cargas imo	Quinta	ñ1	Inflamable	0,3400	23-may-2018
6	Cambio uso estanque almacenamiento de aceite de pescado a etanol, para autonomía operacional en planta golden omega	Decimoquinta	ñ3	Inflamable	0,0380	18-may-2018
7	Cancha de almacenamiento de insumos para la minería	Primera	ñ4	No Inflamable	1,1000	14-may-2018
8	Bodega de sustancias peligrosas – p&g	RM	ñ3	Inflamable	0,3659	23-abr-2018
9	Bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas en instalaciones de anagra s.a.	Quinta	ñ4	No Inflamable	0,0200	22-feb-2018
10	Regularización de planta de producción y bodegas de almacenamiento pirque	RM	k1	No Inflamable	0,5000	30-ene-2018
11	Importación, almacenamiento y transporte de cal viva	Segunda	ñ5	No Inflamable	2,0000	24-ene-2018
12	Centro de almacenamiento de sustancias peligrosas y preparación de soluciones corrosivas	Segunda	ñ4	No Inflamable	6,0000	12-ene-2018
13	Autorización zonas de almacenamiento transitorio de carga peligrosa clasificada como imo	Quinta	ñ1	Inflamable	0,0091	8-ene-2018
14	Adaptación de bodegas generales para almacenamiento de sustancias peligrosas	RM	ñ4	Inflamable	0,1200	3-ene-2018
15	Centro de almacenamiento de sustancias y residuos peligrosos	Quinta	ñ3	Inflamable	0,1000	13-dic-2017
16	Optimización sistema de disposición de riles y continuidad operacional bodega peralillo	Sexta	o7	No Inflamable	0,0793	22-nov-2017
17	Almacenamiento de sustancias químicas y mercancía general	Primera	ñ3	Inflamable	2,0000	26-sep-2017
18	Construcción de bodegas para almacenamiento de sustancias peligrosas	RM	ñ4	No Inflamable	1,8000	12-sep-2017
19	Planta de almacenamiento de alcohol etílico	RM	ñ3	Inflamable	0,0000	5-sep-2017
20	Centro de almacenamiento de agroquímicos, planta chillán	Decimosexta	ñ1	No Inflamable	1,2000	23-jun-2017
21	Modificación uso bodega de sustancias peligrosas	RM	ñ3	Inflamable	4,0000	3-may-2017
22	Construcción de bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas	Segunda	ñ4	No Inflamable	0,6000	11-abr-2017
23	Centro de almacenamiento de sustancias químicas	RM	ñ4	No Inflamable	0,1000	6-ene-2017

N°	Nombre	Región	Tipología	Clase Riesgo	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación
24	Habilitación de bodega para almacenamiento y distribución de líquidos inflamables	RM	ñ3	Inflamable	0,0806	20-dic-2016
25	Bodega de materias primas	Quinta	ñ1	No Inflamable	0,0037	7-dic-2016
26	Optimización de la capacidad de almacenamiento de sustancias químicas	Octava	ñ1	No Inflamable	0,2000	13-oct-2016
27	Bodegas santa marta - maipú	RM	ñ1	Inflamable	6,5000	6-sep-2016
28	Almacenamiento de sustancias peligrosas	Quinta	ñ1	Inflamable	3,5000	4-jul-2016
29	Planta de almacenamiento de productos químicos - portland noviciado	RM	ñ1	Inflamable	60,0000	19-may-2016
30	Ampliación de la capacidad de almacenamiento y logística de productos peligrosos clase 6.1.	RM	ñ1	No Inflamable	0,1150	13-may-2016
31	Cancha de almacenamiento de nitrato de amonio	Primera	ñ4	No Inflamable	0,1000	29-ene-2016
32	Centro de almacenamiento y distribución de pinturas en punta arenas	Duodécima	ñ3	Inflamable	1,0000	8-ene-2016
33	Bodega de productos terminados	RM	ñ1	No Inflamable	0,6720	24-nov-2015
34	Bodegas multipropósito de sustancias químicas en instalaciones de inmobiliaria el cardal s.a.	Quinta	ñ4	Inflamable	0,0700	20-ago-2015
35	Planta de almacenamiento de sustancias peligrosas varias y líquidos inflamables para cbd spa	RM	ñ3	Inflamable	2,0000	17-ago-2015
36	Bodega de almacenamiento de sustancias químicas liplata	RM	ñ1	No Inflamable	3,1500	23-jul-2015
37	aumento de producción y acondicionamiento de bodegas de sustancias peligrosas	RM	ñ3	Inflamable	0,8000	21-jul-2015
38	Almacenamiento de sustancias químicas en contenedores o isotanques	Primera	ñ3	Inflamable	0,0399	13-jun-2015
39	Adecuación bodega para almacenamiento de inflamables	RM	ñ3	Inflamable	1,5000	20-may-2015
40	Bodega para almacenamiento de sustancias peligrosas – sucursal osorno	Décima	ñ1	Inflamable	0,1932	5-may-2015
41	Bodegas almacenamiento sustancias peligrosas de área de abastecimiento	Octava	ñ1	Inflamable	2,6000	27-feb-2015
42	Estanque de almacenamiento de ácido sulfúrico para autonomía operacional en complejo metalúrgico altonorte"	Segunda	ñ4	No Inflamable	6,8000	25-feb-2015
43	Almacenamiento de sustancias químicas peligrosas	Quinta	ñ1	Inflamable	1,0000	22-sep-2014
44	Aumento de capacidad de almacenamiento planta mejillones	Segunda	ñ4	No Inflamable	0,0800	3-sep-2014
45	Ampliación capacidad de almacenamiento planta nash	Octava	ñ4	No Inflamable	6,0000	20-ago-2014

Nº	Nombre	Región	Tipología	Clase Riesgo	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación
46	Normalización y optimización bodega de insumos agrícolas, planta malloco	RM	ñ4	No Inflamable	0,8491	22-jul-2014
47	Aumento de capacidad de almacenamiento de insumos y otros ajustes para autonomía operacional de planta arauco	Octava	ñ4	Inflamable	2,5000	21-jul-2014
48	Aumento de capacidad de almacenamiento de clorato de sodio y fuel oil n° 6 para autonomía operacional de planta nueva aldea	Decimosexta	ñ3	Inflamable	1,8000	18-jul-2014
49	Proyecto bodega materias primas pinturas tricolor s.a.	Quinta	ñ1	Inflamable	2,0000	28-may-2014
50	Bodega de insumos agrícolas colun	Decimocuarta	ñ1	No Inflamable	0,1450	23-may-2014
51	Modificación planta de almacenamiento y distribución de productos para el tratamiento de aguas	RM	ñ4	No Inflamable	3,5000	16-abr-2014
52	Bodegas de almacenamiento de productos químicos peligrosos	RM	ñ1	No Inflamable	0,0000	23-dic-2013
53	Construcción y operación de tres estanques adicionales para el almacenamiento de ácido sulfúrico en terminal mejillones	Segunda	ñ5	No Inflamable	21,0000	3-dic-2013
54	Ampliación de la capacidad de almacenamiento de fenol georgia pacific resinas ltda.	Octava	ñ1	Inflamable	0,2000	21-oct-2013
55	Bodega de producto terminado	RM	ñ4	Inflamable	0,7000	27-sep-2013
56	Ampliación centro de almacenamiento y distribución quilicura oxiquim s.a.	RM	ñ4	Inflamable	5,5000	13-sep-2013
57	Zona de almacenamiento para carga peligrosa en tránsito	Quinta	ñ4	Inflamable	0,0000	28-ago-2013
58	Bodegas de sustancias químicas, bulk industrial	RM	ñ5	Inflamable	0,4000	12-ago-2013
59	Ampliación de bodegas para almacenamiento de sustancias corrosivas, tóxicas y comburentes	RM	ñ1	No Inflamable	0,8000	1-ago-2013
60	Ampliación de bodegas para almacenamiento de sustancias corrosivas, tóxicas y comburentes	RM	ñ1	No Inflamable	0,8000	1-ago-2013
61	Construcción bodega de productos inflamables – laboratorio recalcine	RM	ñ4	Inflamable	0,1873	24-jul-2013
62	Regularización instalación de almacenamiento de sustancias químicas, oxiquim s.a.	Primera	ñ5	No Inflamable	1,0000	23-jul-2013
63	Bodega de sustancias peligrosas en industrias celta	Cuarta	ñ1	Inflamable	3,0000	20-jun-2013
64	Bodega de almacenamiento de inflamables	RM	ñ4	Inflamable	1,0000	17-may-2013
65	Ampliación planta de destilación y almacenamiento de sustancias químicas	RM	ñ4	Inflamable	27,0000	8-feb-2013
66	Almacenamiento de sustancias peligrosas agunsa	RM	ñ4	Inflamable	0,5000	15-ene-2013
67	Centro bodega de almacenamiento de sustancias peligrosas, ecolock	RM	ñ4	Inflamable	16,0000	27-dic-2012

Nº	Nombre	Región	Tipología	Clase Riesgo	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación
68	Ampliación planta de almacenamiento de alcohol etílico	RM	ñ4	Inflamable	0,4500	20-dic-2012
69	Ampliación almacenamiento de productos peligrosos en centro de distribución derco	RM	ñ5	Inflamable	1,6680	29-nov-2012
70	Regularización bodega de almacenamiento sustancias peligrosas	RM	ñ1	No Inflamable	0,1300	16-nov-2012
71	Bodegas de almacenamiento de productos químicos	Quinta	ñ1	Inflamable	1,5000	6-nov-2012
72	Sala de ventas y bodega sucursal coagra curicó	Séptima	ñ1	Inflamable	0,4000	25-oct-2012
73	Bodegas de cal san felipe	Quinta	ñ5	No Inflamable	1,0000	24-sep-2012
74	Bodega de solidos inflamables y raticidas	RM	ñ1	Inflamable	0,1200	23-ago-2012
75	Ampliación bodega de almacenamiento de sustancias inflamables	RM	ñ4	Inflamable	0,0800	6-ago-2012
76	Almacenamiento de cales industriales	Quinta	ñ5	No Inflamable	1,4500	12-jul-2012
77	Almacenamiento de productos peligrosos imo 6, 8 y 9	RM	ñ1	No Inflamable	0,8000	11-jul-2012
78	Bodega de almacenamiento sustancias peligrosas, planta lautaro, anasac	Novena	ñ1	Inflamable	0,0604	4-jun-2012
79	Fabrica de adhesivos y bodega de almacenamiento de productos químicos	RM	ñ4	Inflamable	0,3000	1-mar-2012
80	Bodegas de almacenamiento de productos químicos	Quinta	ñ5	No Inflamable	1,0000	16-feb-2012
81	Planta de almacenamiento de alcohol etílico	RM	ñ4	Inflamable	0,2100	7-feb-2012
82	Declaración de impacto ambiental modificación sistema de almacenamiento de desechos radiactivos sólidos centro de estudios nucleares lo aguirre (exp.nº181/11)	RM	ñ2	No Inflamable	3,0000	23-dic-2011
83	Bodegas de almacenamiento y distribución de productos químicos	RM	ñ1	Inflamable	0,3000	18-nov-2011
84	Proyecto bodegas de almacenamiento de sustancias peligrosas	RM	ñ4	Inflamable	5,0000	4-nov-2011
85	Ampliación de capacidad para almacenamiento de cal viva	RM	ñ5	No Inflamable	0,1200	7-oct-2011
86	Ampliación terminal san antonio vopak chile ltda., para el depósito y manejo de graneles líquidos y almacenamiento de sustancias peligrosas	Quinta	ñ5	Inflamable	11,0000	11-ago-2011
87	Transporte, almacenamiento y disposición de ácido sulfúrico	Segunda	ñ5	No Inflamable	2,0000	10-ago-2011
88	Planta de almacenamiento y distribución de productos químicos para el tratamiento de aguas.	RM	ñ5	No Inflamable	4,0000	8-ago-2011
89	Proyecto ampliación de bodegas de almacenamiento y distribución de cal viva siete puentes comuna de requinoa	Sexta	ñ5	No Inflamable	1,0000	2-ago-2011
90	Ampliación bodegas productos peligrosos warehousing	RM	ñ4	Inflamable	5,2606	11-may-2011

N°	Nombre	Región	Tipología	Clase Riesgo	Inversión (MMU\$)	Fecha presentación
91	Modificación de la importación, transporte de fumigantes agrícolas cloropicrina y 1,3 - dicloropropeno y de los procesos de almacenamiento primario, trasvasije y producción de sus mezclas	Interregional	ñ1	No Inflamable	0,2000	11-abr-2011
92	Almacenamiento de productos químicos peligrosos, clase 8 y 9.	RM	ñ5	No Inflamable	0,4000	16-mar-2011
93	Fábrica de dispersantes y almacenamiento de sustancias inflamables	RM	ñ4	Inflamable	1,1000	19-ene-2011
94	Almacenamiento y distribución de anhídrido sulfuroso	Interregional	ñ1	No Inflamable	0,5635	24-sep-2010
95	Estanque adicional de almacenamiento de ácido sulfúrico	Interregional	ñ5	No Inflamable	3,6500	9-sep-2010
96	Almacenamiento de productos químicos y almacén extraportuario	Segunda	ñ5	Inflamable	5,5000	10-ago-2010
97	Transporte y almacenamiento de cianuro de sodio, mina guanaco	Segunda	ñ1	No Inflamable	0,2000	25-may-2010
98	Bodega buenaventura - almacenamiento y distribución de cal viva, quilicura rm	RM	ñ5	No Inflamable	0,3000	19-abr-2010

Anexo 3: Memoria de cálculo metodología TNT equivalente

Caso 1: Bodega de sustancias peligrosas P&G

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	KJ/Kg
Calor de combustión TNT	4.765	KJ/Kg
Densidad	1,86	Kg/m3
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	1.956	m3
Masa para cálculo sobrepresión	3.638,25	Kg
Masa almacenada	346.500,00	Kg
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	3.638,25	Kg
Masa detonable (UEL)	16.458,75	Kg
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Resultados Parciales		
Masa Equivalente TNT	3.535,2	Kg TNT
Distancia Escalada (Z)	5,38	mKg^1/3
Distancia Real para Gases Pesados	0,28	m

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	56,7
400	82,0
125	172,4
2.705	32,4

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Caso 2: Modificación uso bodega sustancias peligrosas

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	KJ/Kg
Calor de combustión TNT	4.765	KJ/Kg
Densidad	1,86	Kg/m3
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	4.144	m3
Masa para cálculo sobrepresión	7.707,00	Kg
Masa almacenada	734.000,00	Kg
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	7.707,00	Kg
Masa detonable (UEL)	34.865,00	Kg
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Resultados Parciales		
Masa Equivalente TNT	7.488,8	Kg TNT
Distancia Escalada (Z)	5,38	mKg^1/3
Distancia Real para Gases Pesados	0,22	m

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	72,8
400	105,30
125	221,4
2.637	42,0

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Caso 3: Planta de almacenamiento Portland Noviciado

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	KJ/Kg
Calor de combustión TNT	4.765	KJ/Kg
Densidad	1,86	Kg/m3
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	3.952	m3
Masa para cálculo sobrepresión	7.350,00	Kg
Masa almacenada	700.000,00	Kg
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	7.350,00	Kg
Masa detonable (UEL)	33.250,00	Kg
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Resultados Parciales		
Masa Equivalente TNT	7.141,9	Kg TNT
Distancia Escalada (Z)	5,38	mKg^1/3
Distancia Real para Gases Pesados	0,22	m

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	71,6
400	103,6
125	217,9
18.750	19,0

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Caso 4: Centro de almacenamiento Ecolock

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	KJ/Kg
Calor de combustión TNT	4.765	KJ/Kg
Densidad	1,86	Kg/m3
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	5.645	m3
Masa para cálculo sobrepresión	10.500,00	Kg
Masa almacenada	1.000.000,00	Kg
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	10.500,00	Kg
Masa detonable (UEL)	47.500,00	Kg
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Resultados Parciales		
Masa Equivalente TNT	10.202,7	Kg TNT
Distancia Escalada (Z)	5,38	mKg^1/3
Distancia Real para Gases Pesados	0,20	m

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	80,7
400	116,7
125	245,5
22.490	32,4

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Anexo 4: Memoria de cálculo metodología Multi-Energía

Caso 1: Bodega de sustancias peligrosas P&G

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	[KJ/Kg]
Calor de combustión TNT	4.765	[KJ/Kg]
Densidad	1,86	[Kg/m3]
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	1.956	[m3]
Masa para cálculo sobrepresión	3.638,25	[Kg]
Masa almacenada	346.500,00	[Kg]
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	3.638,25	[Kg]
Masa detonable (UEL)	16.458,75	[Kg]
Calor combustión hemiesférico	3,46E+06	[MJ/Kg]
Relación estequiométrica	4%	ad.
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Presión atmosférica	95.448	[Pa]
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Geometría de la Caja		
Largo bodega	64,70	[m]
Ancho bodega	7,35	[m]
Alto bodega	11,71	[m]
Largo rack	62,70	[m]
Ancho rack	1,50	[m]
Alto rack	10,71	[m]
Número de racks	4	ad.
Volumen bodega	5.568,63	[m3]
Volumen racks	3.021,83	[m3]
Volumen no obstruido	2.546,81	[m3]

Tamaño de la Nube		
Volumen nube	1.956,05	[m3]
Energía liberada	6,77E+09	[GJ]
Radio nube	9,77	[m]
Sobrepresión escalada (800 [mbar])	0,84	ad.
Sobrepresión escalada (400 [mbar])	0,42	ad.
Sobrepresión escalada (125 [mbar])	0,13	ad.
Distancia escalada (800 [mbar]) - Gráfico 5.8A	0,75	ad.
Distancia escalada (400 [mbar]) - Gráfico 5.8A	1,40	ad.
Distancia escalada (125 [mbar]) - Gráfico 5.8A	2,70	ad.

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	31,04
400	57,95
125	111,75

Evaluación de la Sobrepresión según Distancia	
Distancia al punto de ignición [m]	32,4
Distancia escalada para 32,4 [m]	0,78
Sobrepresión escalada para 32,4 [m]	1,00
Sobrepresión máxima en muro [mbar]	954,48

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Caso 2: Modificación uso bodega sustancias peligrosas

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	[KJ/Kg]
Calor de combustión TNT	4.765	[KJ/Kg]
Densidad	1,86	[Kg/m3]
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	4.144	[m3]
Masa para cálculo sobrepresión	7.707,00	[Kg]
Masa almacenada	734.000,00	[Kg]
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	7.707,00	[Kg]
Masa detonable (UEL)	34.865,00	[Kg]
Calor combustión hemiesférico	3,46E+06	[MJ/Kg]
Relación estequiométrica	4%	ad.
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Presión atmosférica	95.448	[Pa]
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Geometría de la Caja		
Largo bodega	83,96	[m]
Ancho bodega	48,30	[m]
Alto bodega	11,70	[m]
Largo rack	80,96	[m]
Ancho rack	1,50	[m]
Alto rack	10,70	[m]
Número de racks	40	ad.
Volumen bodega	47.446,64	[m3]
Volumen racks	38.982,24	[m3]
Volumen no obstruido	8.464,40	[m3]

Tamaño de la Nube		
Volumen nube	4.143,55	[m3]
Energía liberada	1,43E+10	[GJ]
Radio nube	12,55	[m]
Sobrepresión escalada (800 [mbar])	0,84	ad.
Sobrepresión escalada (400 [mbar])	0,42	ad.
Sobrepresión escalada (125 [mbar])	0,13	ad.
Distancia escalada (800 [mbar]) - Gráfico 5.8A	0,75	ad.
Distancia escalada (400 [mbar]) - Gráfico 5.8A	1,40	ad.
Distancia escalada (125 [mbar]) - Gráfico 5.8A	2,70	ad.

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	39,87
400	74,42
125	143,52

Evaluación de la Sobrepresión según Distancia	
Distancia al punto de ignición [m]	42
Distancia escalada para 42 [m]	0,79
Sobrepresión escalada para 42 [m]	0,75
Sobrepresión máxima en muro [mbar]	715,86

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Caso 3: Planta de almacenamiento Portland Noviciado

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	[KJ/Kg]
Calor de combustión TNT	4.765	[KJ/Kg]
Densidad	1,86	[Kg/m3]
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	3.952	[m3]
Masa para cálculo sobrepresión	7.350,00	[Kg]
Masa almacenada	700.000,00	[Kg]
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	7.350,00	[Kg]
Masa detonable (UEL)	33.250,00	[Kg]
Calor combustión hemiesférico	3,46E+06	[MJ/Kg]
Relación estequiométrica	4%	ad.
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Presión atmosférica	95.448	[Pa]
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Geometría de la Caja		
Largo bodega	38,00	[m]
Ancho bodega	35,00	[m]
Alto bodega	8,69	[m]
Largo rack	30,00	[m]
Ancho rack	1,50	[m]
Alto rack	7,00	[m]
Número de racks	15	ad.
Volumen bodega	11.557,70	[m3]
Volumen racks	3.543,75	[m3]
Volumen no obstruido	8.013,95	[m3]

Tamaño de la Nube		
Volumen nube	3.951,61	[m3]
Energía liberada	1,37E+10	[GJ]
Radio nube	12,36	[m]
Sobrepresión escalada (800 [mbar])	0,84	ad.
Sobrepresión escalada (400 [mbar])	0,42	ad.
Sobrepresión escalada (125 [mbar])	0,13	ad.
Distancia escalada (800 [mbar]) - Gráfico 5.8A	0,75	ad.
Distancia escalada (400 [mbar]) - Gráfico 5.8A	1,40	ad.
Distancia escalada (125 [mbar]) - Gráfico 5.8A	2,70	ad.

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	39,24
400	73,25
125	141,27

Evaluación de la Sobrepresión según Distancia	
Distancia al punto de ignición [m]	19
Distancia escalada para 19 [m]	0,36
Sobrepresión escalada para 19 [m]	3,50
Sobrepresión máxima en muro [mbar]	3.340,69

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos

Caso 4: Centro de almacenamiento Ecolock

Datos de Ingreso Propano		
Calor de combustión	46.301	[KJ/Kg]
Calor de combustión TNT	4.765	[KJ/Kg]
Densidad	1,86	[Kg/m3]
Concentración de propelente	50%	ad.
Volumen liberado	5.645	[m3]
Masa para cálculo sobrepresión	10.500,00	[Kg]
Masa almacenada	1.000.000,00	[Kg]
Límite inferior de explosividad	2,1%	%
Límite superior de explosividad	9,5%	%
Masa detonable (LEL)	10.500,00	[Kg]
Masa detonable (UEL)	47.500,00	[Kg]
Calor combustión hemiesférico	3,46E+06	[MJ/Kg]
Relación estequiométrica	4%	ad.
Rendimiento de la explosión	10%	ad.
Presión atmosférica	95.448	[Pa]
Temperatura referencia	15	°C
Temperatura de ebullición	230,8	K
Δ Temperatura	-57,2	K

Geometría de la Caja		
Largo bodega	40,00	[m]
Ancho bodega	40,00	[m]
Alto bodega	10,00	[m]
Largo rack	34,00	[m]
Ancho rack	1,50	[m]
Alto rack	9,00	[m]
Número de racks	4	ad.
Volumen bodega	16.000,00	[m3]
Volumen racks	1.377,00	[m3]
Volumen no obstruido	14.623,00	[m3]

Tamaño de la Nube		
Volumen nube	5.645,16	[m3]
Energía liberada	1,95E+10	[GJ]
Radio nube	13,92	[m]
Sobrepresión escalada (800 [mbar])	0,84	ad.
Sobrepresión escalada (400 [mbar])	0,42	ad.
Sobrepresión escalada (125 [mbar])	0,13	ad.
Distancia escalada (800 [mbar]) - Gráfico 5.8A	0,75	ad.
Distancia escalada (400 [mbar]) - Gráfico 5.8A	1,40	ad.
Distancia escalada (125 [mbar]) - Gráfico 5.8A	2,70	ad.

Límite Umbral [mbar]	Distancia [m]
800	44,20
400	82,50
125	159,11

Evaluación de la Sobrepresión según Distancia	
Distancia al punto de ignición [m]	20
Distancia escalada para 19 [m]	0,34
Sobrepresión escalada para 19 [m]	2,50
Sobrepresión máxima en muro [mbar]	2.386,20

Nota: Valores en negrita y sombreados corresponden a datos