

6. APLICACIÓN A TRES TIPOLOGÍAS CONCRETAS DE ACCIDENTES CON SUSTANCIAS PELIGROSAS

6.1. INTRODUCCIÓN

Habiendo analizado en los capítulos precedentes las posibilidades de aplicación de diferentes procedimientos estadísticos al análisis de las consecuencias de los accidentes industriales con sustancias peligrosas, se procede en este a la aplicación de tres técnicas concretas para estimar la gravedad potencial de ciertas tipologías de accidente o sus formas de desarrollo. Las aproximaciones planteadas son susceptibles de ser aplicadas a otros ámbitos u otros conjuntos de datos. Sin embargo, dadas las limitaciones de la base de datos MHIDAS, en muchos casos esta aplicación más generalizada queda limitada.

La primera de ellas analiza la viabilidad de aplicar distintos índices de actualización de precios industriales a la valoración económica conocida de los accidentes, incidiendo en particular, en aquellos relacionados con la industria química de proceso, considerando las ventajas y los inconvenientes de la aplicación de esta técnica al análisis histórico de accidentes y comparando los resultados obtenidos con cinco de los índices más utilizados.

Presenta los resultados obtenidos al analizar, desde un punto de vista general, la evolución histórica del coste de los accidentes registrados en dos bases de datos de reconocido prestigio (por un lado los registros de MHIDAS con valoración económica y por otro los accidentes recopilados por la consultora Marsh-McLennan).

Esta técnica aporta resultados válidos para la toma de decisiones con relación a primas de seguros, revalorización de activos o gerencia de riesgos (administración, gestión de seguridad de grandes complejos químicos, planificación del riesgo, predicción de pérdidas, etc.).

La segunda de las técnicas descritas presenta una nueva metodología para estimar el número de muertos esperable en accidentes por explosión en instalaciones fijas, en función de la cantidad de sustancia interviniente. Se discute la poca fiabilidad de un planteamiento teórico parecido presentado por Marshall en 1977 dada la gran dispersión de los datos no agrupados y se propone una aproximación empírica al problema.

Se rehacen los cálculos de Marshall utilizando la información disponible en la base de datos MHIDAS (actualizada a 1999), se analiza la bondad del ajuste obtenido y se valora la utilidad de estos resultados para su aplicación al análisis de riesgos.

La alternativa que se propone, permite estimar el número máximo probable de muertos y el porcentaje de casos en los que se alcanzará un número determinado de muertos, partiendo del conocimiento de la cantidad de sustancia presuntamente involucrada y mediante la aplicación del análisis histórico de accidentes.

Hay que destacar que el nuevo método propuesto considera tanto las muertes derivadas directamente de la onda de sobrepresión como las debidas a la radiación térmica o al impacto de misiles.

El tercero de los estudios presentados permite obtener árboles de sucesos en los que se identifica la secuencia de eventos desencadenada tras un escape o derrame de sustancias inflamables y las respectivas probabilidades de ocurrencia.

6.2. EVOLUCIÓN DE LOS COSTES ECONÓMICOS DERIVADOS DE LOS ACCIDENTES CON SUSTANCIAS PELIGROSAS

Mediante la aplicación del análisis histórico de accidentes es posible, por un lado, identificar la presencia de peligros reales que en situaciones similares han dado lugar a accidentes conocidos (enfoque cualitativo) y por otro, permite estimar las consecuencias esperables en un incidente determinado, estudiando las que el mismo ha producido en el pasado (enfoque cuantitativo) [CAROL 1999] [CAROL 2000]. Los resultados así obtenidos no pueden considerarse definitivos, ya que existen también muchos factores que los distorsionan, como por ejemplo:

1. Es posible no tomar en consideración algunos peligros presentes en una instalación, debido a que en el pasado no han desencadenado accidentes relevantes que hayan sido convenientemente registrados. Sin embargo es muy probable que el incidente primario sí se haya manifestado, y que un cúmulo de circunstancias afortunadas y aleatorias hayan permitido su control de forma eficiente. En este sentido, de acuerdo con las modernas técnicas del control total de pérdidas, es importante registrar todos los incidentes que se producen en una instalación, aunque sus consecuencias sean reducidas o incluso nulas.
2. La magnitud de un accidente acaecido en el pasado no es necesariamente la que cabe esperar en otros casos similares. Son muchos los factores que pueden alterar, agravando o minorando, las consecuencias del evento objeto de estudio.
3. Las experiencias obtenidas del pasado, si bien son válidas, no son directamente extrapolables a la actualidad. Las modernas técnicas productivas, las nuevas tecnologías, las condiciones de proceso y los procedimientos utilizados en un momento dado no son necesariamente equiparables a los que se daban en el pasado. Por una parte se introducen continuamente nuevos peligros que no estaban presentes entonces y que por lo tanto no han generado historial siniestral precedente. Por otra, cada vez son mayores las medidas de seguridad adoptadas y más eficaces los medios de intervención disponibles.

Además, desde el punto de vista de la valoración económica de los daños derivados de un accidente, cabe tener en cuenta varios aspectos:

1. La concentración de instrumentos de control y la presencia cada vez más difundida de altas tecnologías en las plantas de proceso, incrementa de forma considerable los daños económicos derivados de los accidentes, aunque su alcance sea muy similar a los que se hayan producido en el pasado [PETERS 1991] [POPPER 1970].
2. Los criterios de valoración de los accidentes deben ser revisados y asumidos con cautela, dado que en la actualidad se contemplan muchos factores que antes se ignoraban, tales como los análisis y ensayos de los equipos para verificar la ausencia de daños o la correcta reparación tras un accidente, los requisitos de resaneamiento del medio ambiente tras un accidente industrial (Clean Up), el incremento del ratio de productividad de los equipos, etc. Cualquier valoración de un accidente basada en experiencias pasadas deberá tener en cuenta siempre un factor de actualización en este sentido.
3. En el caso de que se hayan contemplado también las pérdidas por paralización de la planta, y teniendo en cuenta que la productividad de las modernas instalaciones es muy superior a sus equivalentes del pasado, no basta con

actualizar el montante económico de las pérdidas por paralización sino que debe actualizarse el valor de esta pérdida con el factor de productividad correspondiente.

Aun y con todo esto, es evidente que cualquier medida tendente a minimizar las discrepancias existentes entre la información del pasado y la realidad actual contribuirá a obtener unas predicciones más ajustadas y válidas. En este sentido, la actualización de los costes de los accidentes puede permitir una evaluación económica de los daños ocasionados en un determinado escenario de accidente mucho más realista y precisa.

Existen numerosos índices de actualización publicados periódicamente (la American Association of Cost Engineers en su Cost Engineers' Notebook de 1989 recoge referencias a 28 índices elaborados para USA y Canadá y otros tantos para otros países [HUMPHREYS 1993]) y, dado que la información sobre el alcance económico de los daños es muy limitada, cualquiera de ellos es, a priori aplicable. En el presente estudio se analiza la viabilidad de esta aplicación y en su caso se establecen los criterios considerados óptimos para su utilización en este campo.

6.2.1. Metodología de aplicación

Un índice de actualización de costes es un valor indexado respecto al tiempo que permite, conociendo un coste a un tiempo determinado t_0 , estimar el coste a un tiempo t_1 , simplemente multiplicando el valor original por el ratio entre el valor actual del índice y el valor aplicable en el momento inicial. Este procedimiento puede expresarse según la Ec. (6.1).

$$C_1 \approx C_0 * \frac{I_1}{I_0} \quad (6.1)$$

Donde:

- C_1 : Coste a tiempo t_1
- C_0 : Coste a tiempo t_0
- I_1 : Valor del índice a tiempo t_1
- I_0 : Valor del índice a tiempo t_0

En cualquier caso, tan sólo se pretende una estimación del coste actual por lo que pueden encontrarse divergencias puntuales muy significativas.

6.2.2. Descripción de los índices considerados

En el presente estudio se han contemplado los siguientes índices, por ser los más utilizados en la industria química de proceso: Marshall and Stevens Equipment Indexes (M&S), Chemical Engineering Plant Cost Index (CEPC), Engineering News Record Construction Cost Index y Building Cost Index (ENR-BCI y ENR-CCI) y el Nelson Farrar Refinery Construction Cost Index (NFCC) [THORSEN 1972].

El índice Marshall, conocido como Marshall & Stevens [STEVENS 1947], fue creado en 1937 y facilita índices de referencia desde 1913 (base 100 en 1926). No es específico para la industria química. El índice relativo a la industria de proceso

contempla ocho sectores, con los siguientes pesos relativos presentados en la Tabla 6.1.

El 70% de este índice está basado en costes relacionados con la industria química o la del petróleo, por lo que resulta suficientemente significativo para este tipo de actividades. En su confección se tiene en cuenta el coste de la maquinaria, los costes de instalación, herramientas, estructuras, mobiliario de oficina y equipo complementario.

Tabla 6.1. Pesos relativos de cada sector industrial en el índice M&S.

SECTOR	%
Químicas	48%
Petróleo	22%
Papel	10%
Goma-plástico	8%
Pintura	5%
Vidrio	3%
Cemento	2%
Productos arcillosos	2%

El Chemical Engineering Plant Cost Index fue desarrollado a partir de 1963 y facilita parámetros a partir de 1947. Es específico para la industria química de proceso y sus componentes principales son: Equipamiento y maquinaria, 61%; coste de construcción e instalación 22%; Edificaciones y materiales (incluye mano de obra), 7% e Ingeniería y supervisión, 10% [ARNOLD 1963] [CHILTON 1959] [CHILTON 1966] [KOHN 1978] [MATLEY 1985] [NORDEN 1969] [RICCI 1975].

Los índices publicados por el Engineering News-Record, el Construction Cost index y el Building Cost index, son aplicables a costes generales de la construcción y por lo tanto carecen de especificidad. La diferencia principal entre ellos es la componente de mano de obra, que para el primero de ellos es de 200 horas y para el segundo es de 68,38. Por lo demás, su estimación se hace tomando el precio medio en 20 ciudades estadounidenses de las siguientes partidas: 2.500 libras de acero estructural, 1.088 fbm de maderos y 2.256 libras de cemento. Se dispone de datos desde 1908.

El Nelson Farrar Refinery Construction Cost Index [NELSON 1958] es específico para la industria del petróleo y pondera los siguientes componentes: 30 % de mano de obra cualificada, 30% de mano de obra no cualificada, 20% de hierro y acero, 8% de materiales de construcción diversos y 12% para el equipo complementario.

La Figura 6.1 presenta la evolución de estos índices desde 1913 a 1998, con los valores originales. En la Figura 6.2. se presentan los mismos índices normalizados a 1999, con base 100, únicamente a efectos comparativos.

Como puede apreciarse, existe cierto paralelismo entre ellos hasta, aproximadamente, 1980, fecha en la que, si bien siguen con la misma tendencia ascendente, las pendientes se hacen distintas. Pintelon y Van Puyvelde [PINTELON 1997] atribuyen esta evolución divergente al efecto de la desaceleración de la inflación en Estados Unidos durante esos años y a la sobreproducción de equipamiento industrial existente desde 1970 (y la lógica competencia por el mercado).

Ello pone de manifiesto dos grandes problemas existentes a la hora de aplicar un índice de actualización de forma global. Por una parte, los cinco índices citados se han

definido y construido en Estados Unidos y su valoración es difícilmente extrapolable a cualquier otra región. Por otra parte, resulta evidente que según se escoja uno u otro índice, se pondera de forma diferente uno u otro factor, afectando de forma sensible el resultado que pueda obtenerse en su aplicación.

Figura 6.1. Evolución de los índices considerados con el tiempo.

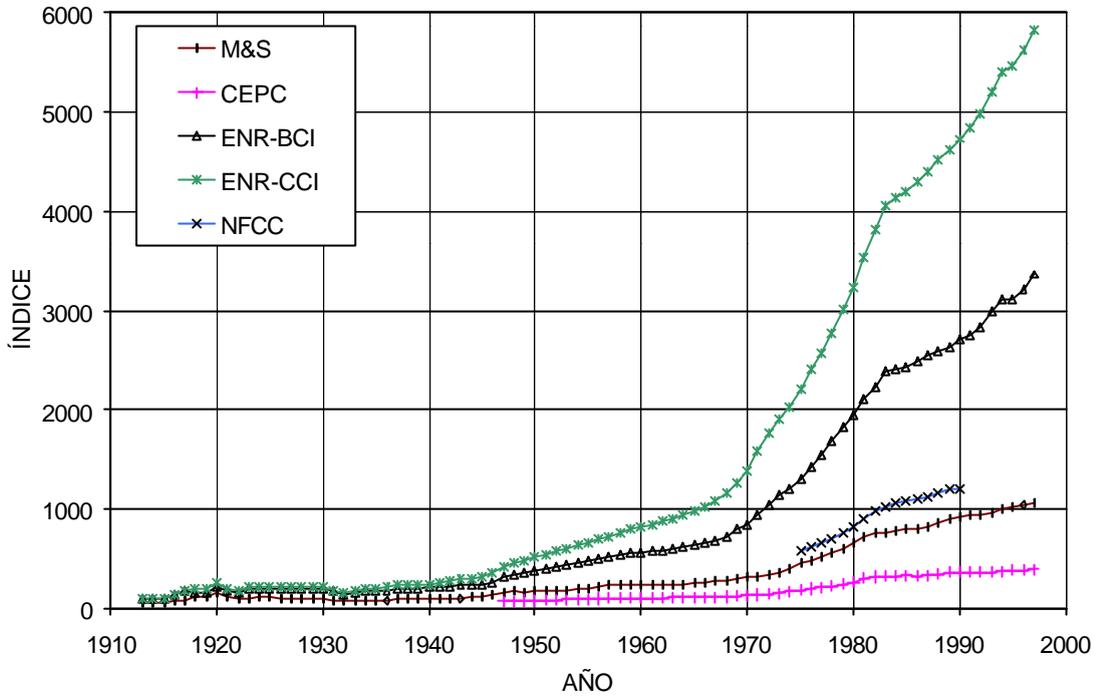
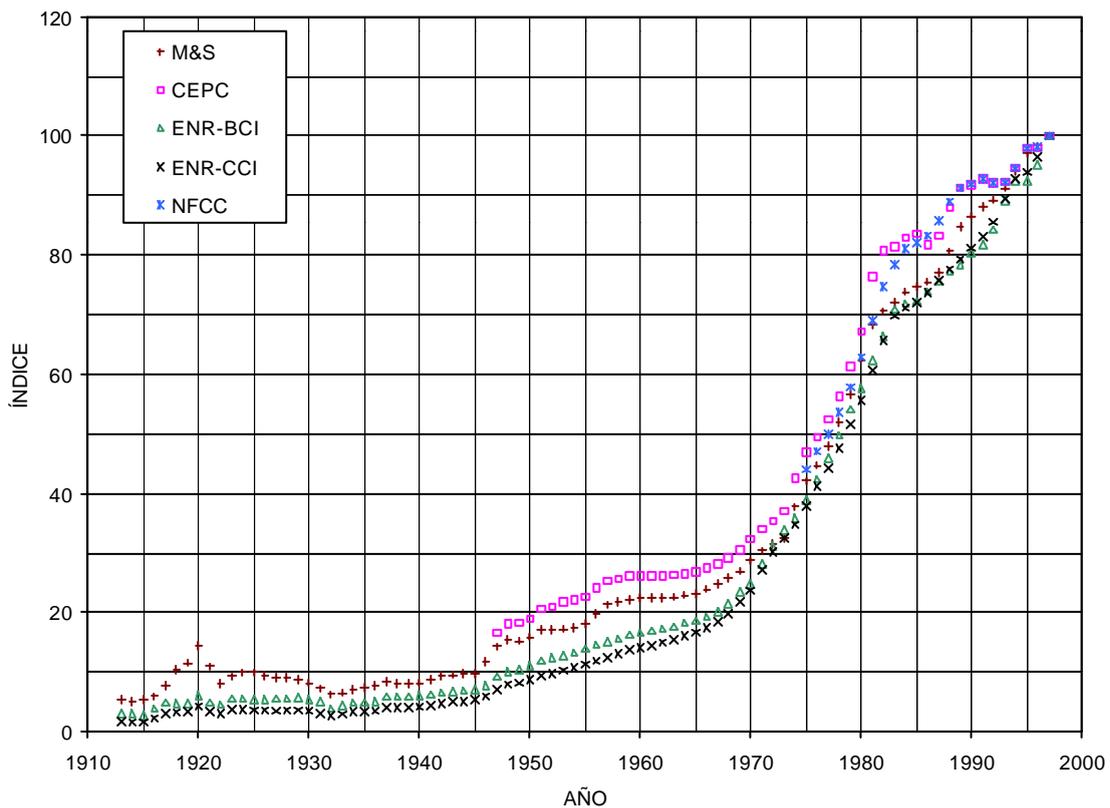


Figura 6.2. Evolución de los distintos índices con el tiempo, normalizados en base 100 a 1999.



Ante el primero de los inconvenientes citados anteriormente, la limitación geográfica, Pintelon y Puyvelde han propuesto una metodología que permite extrapolar estos índices a otras regiones si se conocen ciertos parámetros básicos de las economías locales. Sin embargo, no se conoce ningún índice que permita una actualización de costes independientemente del país o región de que se trate. Posiblemente un índice de estas características sería tan genérico que los resultados obtenidos serían poco significativos.

Por lo que hace referencia a la divergencia de resultados entre uno y otro índice es fácil observar que existe una correlación importante entre los tres índices CEPC, M&S y NFCCI, mientras que los publicados por Engineering News-Record difieren significativamente, en especial a partir de 1970. La razón fundamental de este distanciamiento se debe a que los índices de ENR no contemplan una corrección del aumento de productividad de los métodos de trabajo actuales.

La Figura 6.3 representa el error máximo de estimación (error máximo de estimación en que se incurre al emplear la media muestral para estimar la media poblacional en una población normal con un volumen muestral pequeño [MILLER 1986]), con un margen de confianza del 95%, existente entre los cinco índices considerados, entendido como:

$$E = t_{\alpha/2} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6.2)$$

$$E\% = \frac{E}{x} \cdot 100 \quad (6.3)$$

Donde:

- E: Error máximo de estimación
- $t_{\alpha/2}$: Estadístico t de Student
- S: Desviación estándar muestral
- n: Número de individuos de la muestra
- E%: Error porcentual máximo de estimación
- x: Media de la muestra.

La serie representada como "ERROR" es la correspondiente a considerar todos los índices analizados, mientras que la identificada como "ERROR2" corresponde a las discrepancias sin considerar los índices ENR, que como se ha visto anteriormente eran menos representativos para la industria química y se distanciaban significativamente de los otros tres. Puede apreciarse con facilidad que para este segundo caso el error máximo cometido no alcanza el 28% y que la media se sitúa en el 13,6%, disminuyendo significativamente a medida que se avanza en el tiempo.

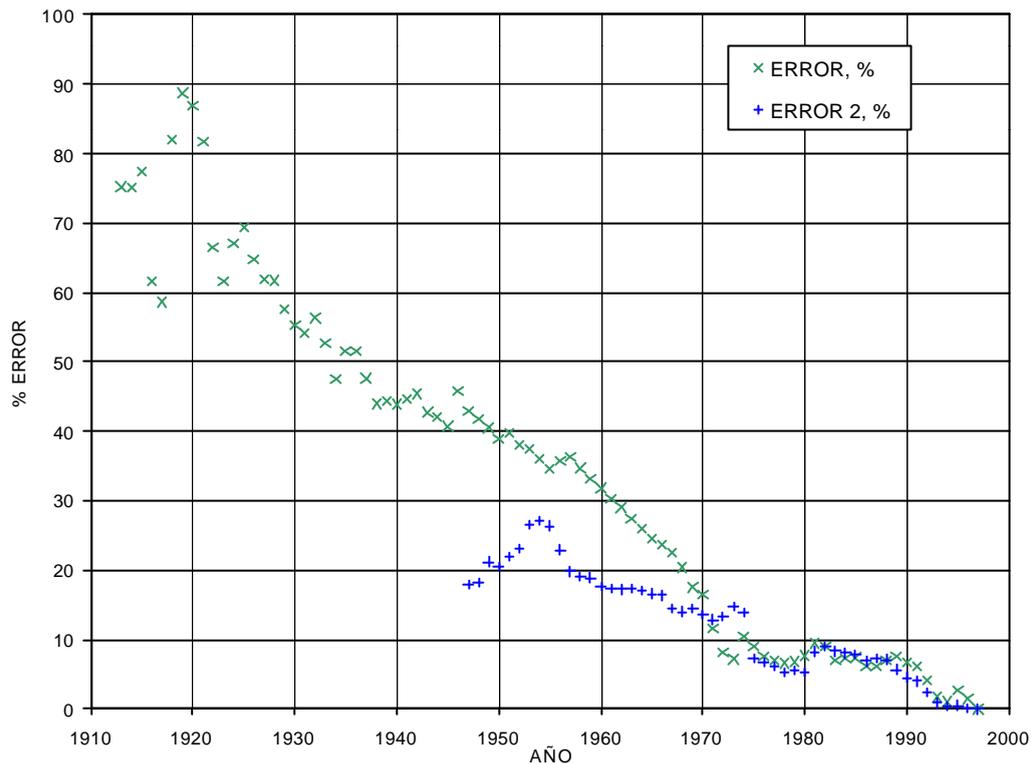
6.2.3. Criterios de aplicabilidad

A pesar de todas estas matizaciones sobre la "calidad" de los índices disponibles y su posible uso en la actualización del coste económico de los accidentes industriales, las informaciones disponibles son tan poco precisas que cualquier discusión sobre el grado de adecuación de uno u otro índice no tiene sentido.

Las fuentes de información con las que habitualmente se trabaja para obtener este tipo de datos, en el mejor de los casos, tan sólo disponen de una cuantificación económica

global de los daños ocurridos, sin ningún tipo de matización. ¿Se contemplan en esa cifra los gastos de descontaminación? [REDONDO 1997]; las pérdidas consecuenciales derivadas del evento, ¿Se valoran como pérdida del beneficio esperado o como gastos permanentes soportados?; ¿Con qué criterio se hace la valoración económica de los bienes?. Normalmente, todas estas cuestiones quedan sin respuesta.

Figura 6.3. Error máximo de estimación en función del tiempo.



Así pues, ante una información tan escueta, resulta estéril cualquier discusión sobre la validez de aplicación de uno u otro índice basándose en la ponderación de sus componentes o en el mayor o menor número de factores que analiza.

A la hora de seleccionar uno u otro índice, el criterio de selección básico debe ser la especificidad del mismo respecto al sector industrial al que pertenecen los accidentes considerados. Siempre se obtendrán mejores aproximaciones utilizando índices específicos que usando otros más genéricos. Sin embargo, estos últimos pueden resultar válidos cuando se estudia un conjunto de accidentes que no pertenecen a un sector industrial específico.

Para el caso particular de la industria química, como se ha visto anteriormente, el Chemical Engineering Plant Cost Index, y en menor medida el Marshall & Stevens Index (48% industria química, 22% petróleo), resultan óptimos frente a los índices de ENR.

Otro factor relevante puede ser la disponibilidad de datos retrospectivos cuando se pretenden actualizar valoraciones muy antiguas. En este sentido, los índices Marshall

y ENR-BCI y ENR-CCI disponen de datos desde 1913. Sin embargo hay que valorar convenientemente qué utilidad y qué representatividad pueden tener las valoraciones obtenidas cuando los procesos industriales, las instalaciones y los equipos difieren tanto de los actuales y conviene tener en cuenta que muchos autores no recomiendan el uso de índices más allá de los quince-veinte años.

6.2.4. Valoración económica de los accidentes de dos bases de datos

Para este estudio comparativo se han considerado dos recopilaciones de accidentes: La base de datos MHIDAS y el informe de Marsh-McLennan de 1995. La base de datos MHIDAS, contenía información sobre 912 accidentes cuyas repercusiones económicas habían sido valoradas (incluidos los producidos por transporte de sustancias peligrosas). De ellos se han considerado los 860 que han acaecido entre 1955 y 1995, excluyendo el accidente referenciado como AN 3690 correspondiente al vertido de crudo del barco Exxon Valdez en Alaska, ocurrido en 1989 y cuya valoración económica se considera extraordinaria (2.000 millones de dólares en aquella fecha). A falta de información más precisa, cuando se indica el alcance económico de los daños precedido de símbolos tales como '>' o '<', se considera el valor límite, como dato objetivo más próximo a la realidad.

El informe Marsh-McLennan publica de forma periódica los mayores accidentes acaecidos en la industria del gas y del petróleo, incluyendo una descripción básica del accidente y una valoración económica de sus consecuencias. En su informe de 1995, se presentan 100 casos ocurridos entre 1965 y 1994, todos ellos valorados económicamente [MAHONEY 1995].

La Figura 6.4 presenta la evolución del coste medio por anualidad de los accidentes de la base de datos MHIDAS desde 1955 a 1995, con valores actualizados según los tres índices considerados como óptimos. Se observa una tendencia claramente creciente (pendiente: 0,38 en la Ec (6.4)) que no puede ser atribuida al efecto inflación, pues éste ha sido corregido mediante la actualización de costes descrita. Asimismo se evidencia una buena adecuación entre los resultados obtenidos en la actualización a través de los distintos índices.

Las discrepancias que se obtienen al considerar uno u otro son poco significativas atendiendo a la baja precisión de las informaciones disponibles, resultando interesante observar que el índice M&S aporta siempre resultados más altos que los otros dos índices. Los resultados obtenidos al aplicar el CEPC y el NFCCI son prácticamente idénticos.

Al comparar la evolución de los costes medios por anualidad obtenidos con cada conjunto de datos (Figura 6.5), puede apreciarse una significativa discrepancia entre las medias de uno y otro conjunto. Sin embargo es posible justificar esta discrepancia ya que el informe Marsh-McLennan recoge sólo 100 casos, mientras que MHIDAS recopila 860 eventos. Asumiendo que se registran prioritariamente los accidentes más relevantes, es obvio que MHIDAS debe registrar accidentes mucho menores que los contemplados en el informe Marsh-McLennan [GARCIA 1987].

Figura 6.4. Evolución del coste medio de los accidentes de la base de datos MHIDAS.

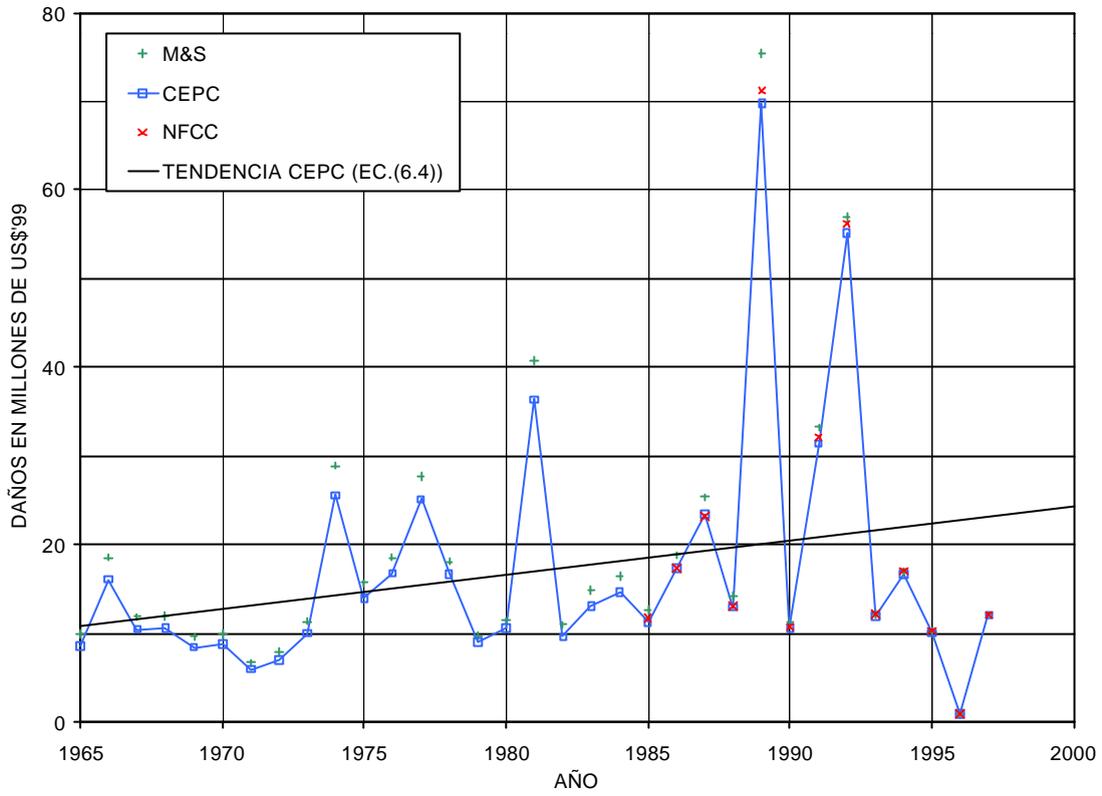
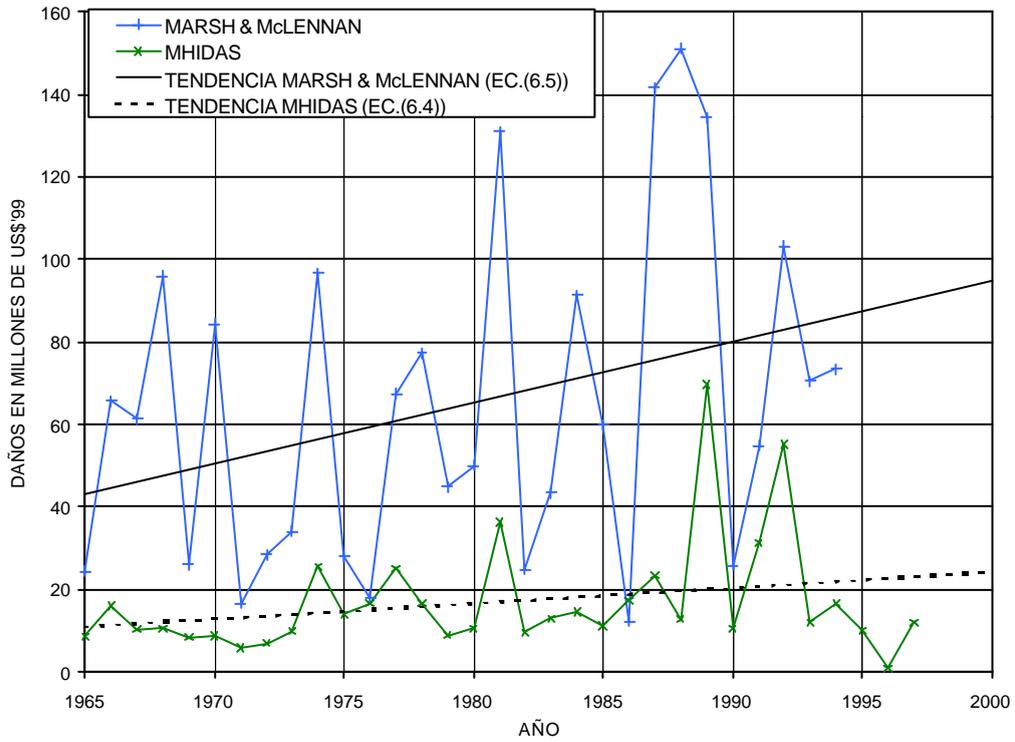


Figura 6.5. Evolución de los costes medios de las dos series de datos.



De hecho, si en lugar de analizar el coste medio por anualidad de cada conjunto, se considera sólo el accidente más grave (desde un punto de vista económico) de cada anualidad, los resultados obtenidos son significativamente similares, tal como se puede apreciar en la Figura 6.6 y en las Tablas 6.2a y 6.2.b

Tabla 6.2.a. Accidentes más importantes recogidos en MHIDAS en el periodo 1955-1995 con valoración económica conocida y actualizada con el índice CEPC a 1999.

Ref.	Año	Sustancia	País	Cantidad Tm	Daños MM US\$	Tipo Accidente	Origen
1959	1964	Petróleo crudo	Japón	>99.999	284,5	Fuga-incendio	Almacén
3688	1974	Petróleo crudo	Japón	8.000	392,3	Fuga	Almacén
598	1981	NO ₆ Fuel oil	USA	350	359,9	Fuga	Transporte
1305	1986	Petróleo crudo	Grecia	>10.000	359,6	Incendio-Explosión	Almacén
2829	1987	Butano	USA	¿?	353,6	Explosión-Incendio	Proceso
3712	1989	Petróleo crudo	Nigeria	¿?	322,2	Incendio	Proceso
5151	1991	Gas	Alemania	¿?	278,6	Explosión	Comercial
5944	1992	Gas	Francia	¿?	394,3	Explosión-Incendio	Proceso

Figura 6.6. Pérdidas económicas máximas por accidente y año según las dos bases de datos.

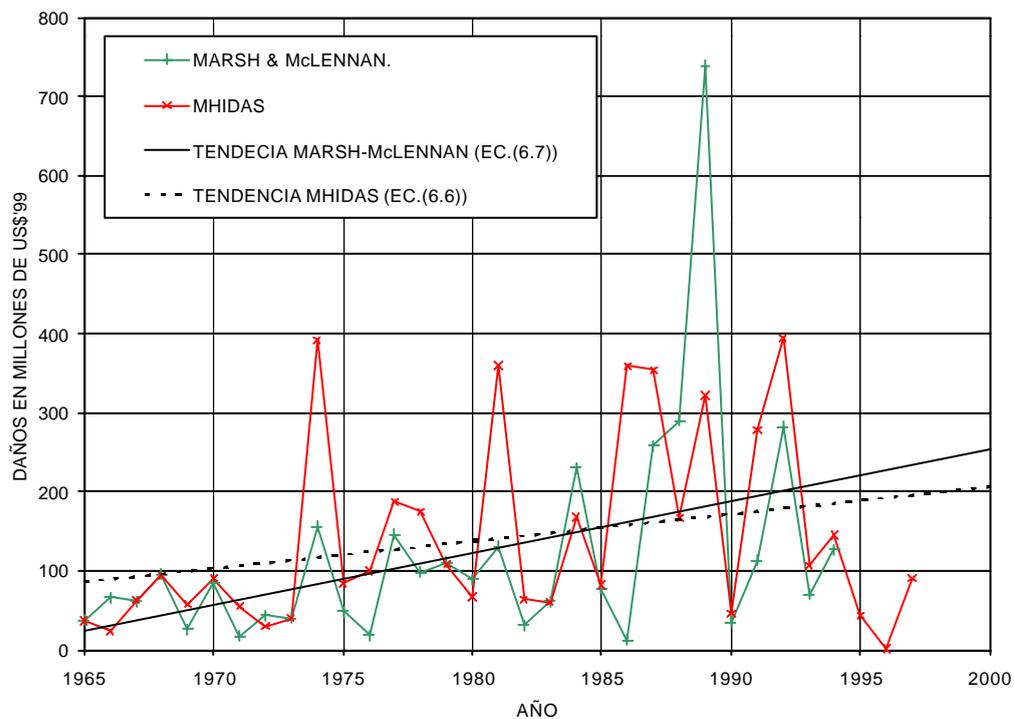


Tabla 6.2.b. Accidentes más importantes recogidos en el informe Marsh-McLennan en el periodo 1965-1995. Valoración actualizada con el índice Chemical Engineering a 1999.

Ref.	Año	Sustancia	País	Cantidad	Daños MM US\$	Tipo Accidente	Origen
31P	1974	Ciclohexano	UK	433.000 g	152,7	Nube-Explosión	Proceso
23R	1984	Propano	USA	¿?	225,9	Incendio-Bleve	Proceso
17P	1987	Gas	USA	¿?	253,8	Nube-Incendio	Proceso
19R	1988	Gas C3	USA	20.000 Lb	283,8	Nube-Explosión	Proceso
14P	1989	Isobutano	USA	10 TNT eq	724,9	Nube-Explosión	Proceso
3R	1992	Gas	Francia	11.000 Lb	277,1	Nube-Explosión	Proceso

Las rectas de regresión obtenidas por el método de mínimos cuadrados ponen de manifiesto una clara tendencia creciente en la gravedad de los accidentes y permiten incluso una predicción para los próximos años, resumida en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Resumen de los daños esperables en el año 2000 según la tendencia considerada desde 1965. (Daños en millones de dólares a 1996, con márgenes de confianza del 95%)

DAÑOS MEDIOS Y MÁXIMOS ESPERABLES EN EL AÑO 2000			
	ECUACIÓN	DAÑO	MAX
MHIDAS (Medias)	Y=0,38 X – 735,9 (6.4)	24,1	57,99
MARSH-McLENNAN (Medias)	Y=1,47 X – 2.838 (6.5)	102	179,4
MHIDAS (Máximos)	Y=3,44 X – 6.666 (6.6)	214	497,8
MARSH-McLENNAN (Máximos)	Y=6,53 X – 12.812 (6.7)	248	585,4

Los límites superiores citados, para un margen de confianza del 95%, se han obtenido mediante la Ec. (6.8)

$$y = (a + bx_0) \pm t_{a/2} \cdot s_e \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{n(x_0 - \bar{x})^2}{s_{xx}}} \tag{6.8}$$

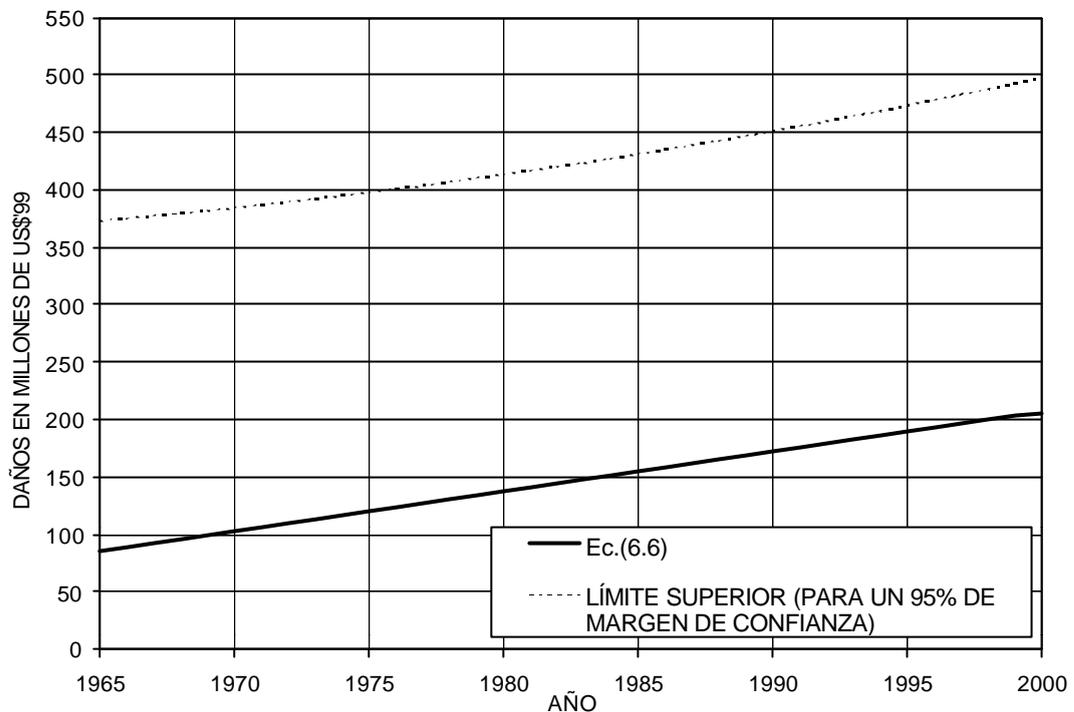
Donde:

$$s_{xx} = n \sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n x_i \right)^2 \tag{6.9}$$

- a, b : Coeficientes de la recta de regresión.
- x₀ : Término independiente.
- t_{x/2} : Valor del estadístico t de Student en este caso para un margen de confianza del 95%.
- s_e : Estimador de la desviación estándar
- n : Número de datos utilizados en el cálculo.

Por último, la Figura 6.7 refleja a título de ejemplo, la tendencia lineal manifestada por los datos de MHIDAS (accidentes máximos por anualidad) junto a los límites de confianza para un margen del 95%.

Figura 6.7. Daños máximos por accidente y año según la base de datos MHIDAS.



6.2.5. Conclusiones

Descartando los índices de Engineering News-Record (Building Cost Index y Construction Cost Index), los resultados obtenidos con los restantes son similares, con un error máximo entre ellos del 28% y medio del 12,6%.

A falta de otras informaciones y con los datos disponibles, cualquiera de ellos es aceptable. Para accidentes relacionados con la industria química, en general, será más adecuado trabajar con el Chemical Engineering Plant Cost Index o con el Marshall & Stevens Index, pero si se conoce con mayor precisión el origen de las valoraciones económicas, el sector al que corresponden los accidentes, o la situación geográfica del mismo, pueden existir criterios objetivos que permitan optar por otros índices.

En cualquier caso, utilizando el índice Marshall se obtiene siempre la valoración más elevada, lo que implica situarse en el caso más desfavorable posible a la hora de estimar las consecuencias económicas de un evento determinado.

Si bien puede resultar tentador ampliar la información disponible utilizando datos actualizados de muchos años atrás, debe siempre tenerse presente que las condiciones de operación y características constructivas nada tienen que ver con las del pasado, por lo que la interpretación de datos muy atrasados en el tiempo deberá estar siempre muy justificada.

Analizando los accidentes registrados en la base de datos MHIDAS y en el informe de Marsh-McLennan, se obtienen resultados significativamente similares que muestran

una tendencia importante a que cada vez se produzcan accidentes mayores cuya media crece a un ritmo de entre medio y un millón de dólares por año. Asimismo, los accidentes más graves registrados en cada anualidad presentan también una tendencia creciente, mucho más significativa que la anterior (5 millones de dólares por año).

Mediante la utilización de técnicas de estadística descriptiva es posible por tanto estimar los daños esperables en un futuro próximo, con un margen de confianza conocido.

6.3. ESTIMACIÓN DEL NÚMERO DE MUERTOS EN EXPLOSIONES ACCIDENTALES

Como hemos visto ya en el apartado anterior, el análisis histórico de accidentes ofrece interesantes posibilidades en la estimación de los daños humanos y materiales que pueden esperarse de un determinado escenario accidental aunque este aspecto ha sido poco explorado.

Las consecuencias de un gran número de accidentes con unas características comunes permite establecer el orden de magnitud o de valores límite para los daños más probables. Es evidente que lo que permite este método es la obtención de los valores "esperables" estadísticamente hablando. Los resultados obtenidos serán difícilmente aplicables, por tanto, en un caso concreto: lógicamente, el número de muertos en un determinado accidente mayor dependerá no sólo de sus efectos físicos (intensidad de radiación, onda de sobrepresión, evolución de la concentración) sino también de la distribución de la población en la zona afectada por el accidente. Aún y con ello, los resultados de un análisis histórico relacionando las consecuencias de un accidente con, por ejemplo, la cantidad de material que está involucrada, pueden ser muy útiles para evaluar cuantitativamente la tolerabilidad de determinados riesgos, para efectuar análisis de riesgos de zonas industriales o para obtener una aproximación a las curvas f-N asociadas a un determinado escenario accidental.

En este apartado se presenta una nueva metodología para estimar las consecuencias esperables sobre personas (número de muertos) de accidentes involucrando explosiones ocurridas en instalaciones fijas (el estudio no comprende ni los accidentes acaecidos en transporte ni los ocurridos con explosivos convencionales ni en instalaciones militares) [CAROL 2001].

6.3.1. Efectos de las explosiones: correlación simple de datos experimentales

Es bien conocido que la sobrepresión originada por una explosión es función de la raíz cúbica de la masa de material que interviene en la misma, Q. Por tanto, la distancia máxima a la cual el valor de la sobrepresión es todavía letal es también función de la raíz cúbica de Q. Suponiendo una densidad de población uniforme, el número de muertos F que puede esperarse es pues proporcional a la superficie afectada y esta, a su vez, depende del cuadrado de la distancia al centro de la explosión [CCPS-AICHE 1994], [DOCE 1997-1], [HAASTRUP 1990]. Así:

$$F = k \times (Q^n)^2 = k \times Q^P \quad (6.10)$$

donde $m=1/3$, $n=2$ y $P=2/3$. Esta expresión puede expresarse también de la forma siguiente:

$$\frac{F}{Q} = k \times Q^q \quad (6.11)$$

donde $q=-1/3$.

No obstante, esta expresión puede alejarse considerablemente de la realidad al ser aplicada a un caso concreto, ya que:

1. La densidad de población puede variar mucho de un accidente a otro; es evidente que dos accidentes de iguales características pueden causar un número de muertos muy diferente en función de la cantidad de personas presente en la zona de influencia de la explosión (densidad de población).
2. Esta densidad de población alrededor del origen de la explosión no es uniforme y, por tanto, la población afectada no es necesariamente proporcional a la superficie.
3. Las muertes derivadas de una explosión accidental pueden no ser debidas exclusivamente a los efectos de la sobrepresión, sino que intervienen también factores como la radiación térmica, las intoxicaciones por humos o gases tóxicos.
4. La sobrepresión alcanzada no depende sólo de la cantidad de material involucrado, sino también de eventuales efectos de confinamiento parcial.
5. Finalmente, la cantidad de material citada en las bases de datos como involucrada en el accidente no tiene porque coincidir con la cantidad de sustancia que realmente ha participado en la explosión.

Sin embargo, esta expresión ha sido propuesta como una primera aproximación a la estimación de las consecuencias de las explosiones accidentales. A partir de una serie de datos correspondientes a 162 explosiones, Marshall [MARSHALL 1977] estableció que el mejor ajuste para la Ec. (6.11) se obtenía con $K = 4$ y $q = -1/2$, obteniendo así un valor que él denominó "índice de mortalidad" (F/Q). La misma expresión ha sido aplicada a 352 explosiones registradas en la base de datos MHIDAS hasta enero de 1999 [KIRCHSTEIGER 1998]. La Tabla 6.4 presenta los 352 accidentes agrupados por categorías. La primera columna indica el rango de toneladas de sustancia interviniente considerado en cada clase; las tres siguientes indican el total de muertos, el total de toneladas y el número de accidentes de cada clase y las tres últimas registran, respectivamente, el número de muertos promedio por accidente, las toneladas intervinientes por accidente (promedio) y el ratio de muertes por tonelada, calculado como cociente de los dos anteriores.

Utilizando por tanto el mismo procedimiento de cálculo y regresión usado por Marshall, el resultado obtenido para estos coeficientes ha sido $K = 4,6$ y $q = -0,8$ (coeficiente de regresión $R^2 = 0,9$), adoptando la correlación la siguiente forma:

$$\frac{F}{Q} = 4,6 \times Q^{-0,8} \quad (6.12)$$

O lo que es lo mismo

$$F = 4,6 \times Q^{0,2} \quad (6.13)$$

Tabla 6.4. Datos de MHIDAS utilizados para el cálculo de los coeficientes de la Ec. (6.12), según en procedimiento de Marshall.

Toneladas (min-max)	Nº de muertos total (1)	Toneladas totales (2)	Nº de acctes. (3)	Muertos (media) A:(1)/(3)	Toneladas (media) B:(2)/(3)	Muertos por tonelada A/B
0 - 0,045	6	0,04	4	1,50	0,01	136,36300
0,046 - 0,143	8	1,08	12	0,67	0,09	7,40740
0,144 - 0,453	112	3,66	13	8,62	0,28	30,60100
0,454 - 1,436	141	21,00	26	5,42	0,80	6,71428
1,437 - 4,530	108	84,32	31	3,48	2,72	1,28083
4,531 - 14,360	271	360,01	39	6,95	9,23	0,75276
14,360 - 45,300	584	1.386,42	55	10,62	25,21	0,42122
45,301 - 143,600	1.157	3.838,70	46	25,15	83,45	0,30140
143,601 - 453,000	149	4.757,00	19	7,84	250,37	0,03132
453,001 - 1.436	1.695	27.764,00	32	52,97	867,63	0,06105
1.437 - 4.530	3.291	75.848,60	31	106,16	2.446,73	0,04338
4.531 - 14.360	662	206.763,00	23	28,78	8.989,70	0,00320
14.361 - 45.300	65	263.270,00	11	5,91	23.933,64	0,00024
45.301 - 143.601	150	711.998,00	9	16,67	79.110,89	0,00021
>143.601	23	154.200,00	1	23,00	154.200,00	0,00014
TOTAL	8.422	1.450.295,8	352			

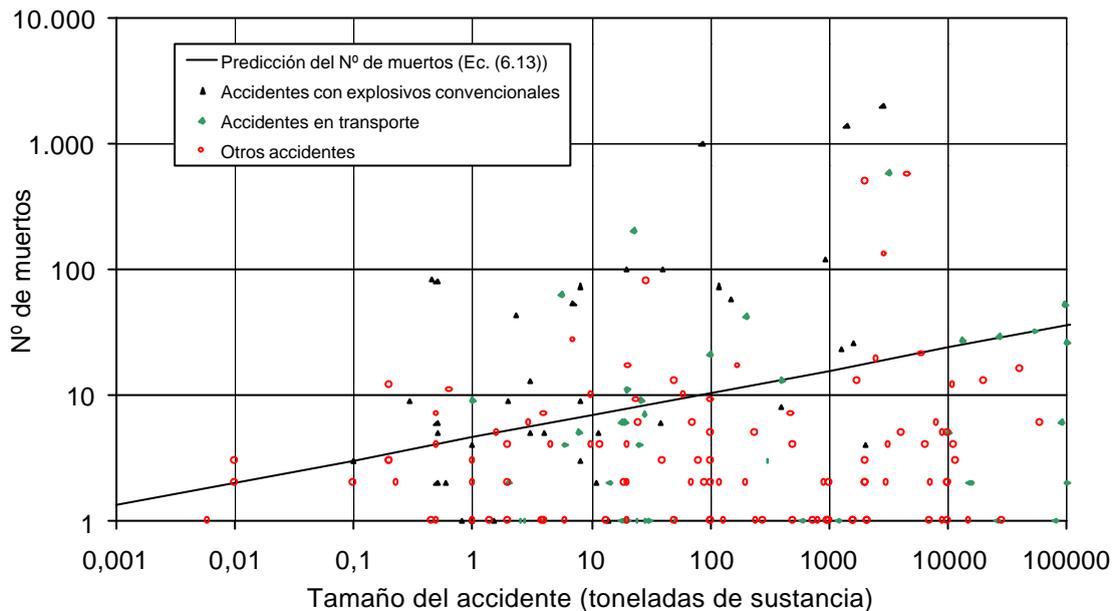
Aunque aparentemente el ajuste así conseguido es francamente bueno, estas correlaciones tienen un escaso valor predictivo, debido a las razones antes mencionadas. Esto se pone de manifiesto en la Figura 6.8, donde se compara la Ec. (6.13) con los datos procedentes de MHIDAS. La dispersión es tan grande, que el valor de predicción de la correlación es prácticamente nulo. Parece pues evidente que para poder hacer algún tipo de predicción a partir de estos datos es necesario un tratamiento diferente. (En los datos utilizados para la obtención de las Ec. (6.12) y (6.13), se han incluido los accidentes correspondientes a transporte y explosivos convencionales).

6.3.2. Estimación del número máximo de muertos

En la Figura 6.8. se identifican en series diferenciadas los accidentes en los que han intervenido sustancias explosivas y aquellos que se han producido en el transporte de sustancias peligrosas. Sin embargo, en el proceso seguido a partir de este punto se excluyen de este estudio los accidentes debidos a la manipulación y/o fabricación de explosivos convencionales (TNT, dinamita, pólvora, pólvora negra, municiones) ya que

presentan una gravedad potencial significativamente más elevada que el resto. Asimismo, para adaptar en lo posible el resultado de este estudio a la evaluación de riesgos en empresas afectadas por la Directiva 96/82/EC- "Seveso II", se descartan también los accidentes originados en el transporte de sustancias peligrosas [LEES 1996] [MARSHALL 1977].

Figura 6.8. Distribución del número de muertos frente a la cantidad de sustancia explosionada.



En la Figura 6.9 se representan los 102 accidentes, de entre los 213 seleccionados, que han causado una o más muertes. Los más significativos han sido etiquetados con el fin de que se puedan identificar en la Tabla 6.5.

En el mismo sentido, la Figura 6.10 muestra sólo los 63 accidentes ocurridos con posterioridad a 1975 con uno o más muertos, del total de 148 accidentes registrados en el periodo 1975-1999.

Los accidentes ocurridos antes de 1975 no se consideran para la obtención de la Ec. (6.14) dado que han ocurrido mucho tiempo atrás y en otro entorno tecnológico, donde las medidas de seguridad y planificación del riesgo no eran comparables con las que existen actualmente. Este es el caso del accidente número 8 (Oppau, 1921) o el accidente número 11 (Feyzin, 1966). Asimismo, rechazamos el accidente número 5 (San Juanico, 1984) porque sus consecuencias son absolutamente atípicas. A pesar de que este criterio puede parecer arbitrario, la distribución de puntos de la Figura 6.10 demuestra que esta decisión es consistente.

Considerando los restantes accidentes, se propone la Ec. (6.14) (Figuras 6.9 y 6.10) que permite estimar el número máximo de muertos (F_{max}) que cabe esperar en una explosión accidental en una instalación fija en la que intervengan Q toneladas de sustancia no explosiva.

Figura 6.9. Nº máximo de muertos en función de la cantidad de sustancia involucrada.

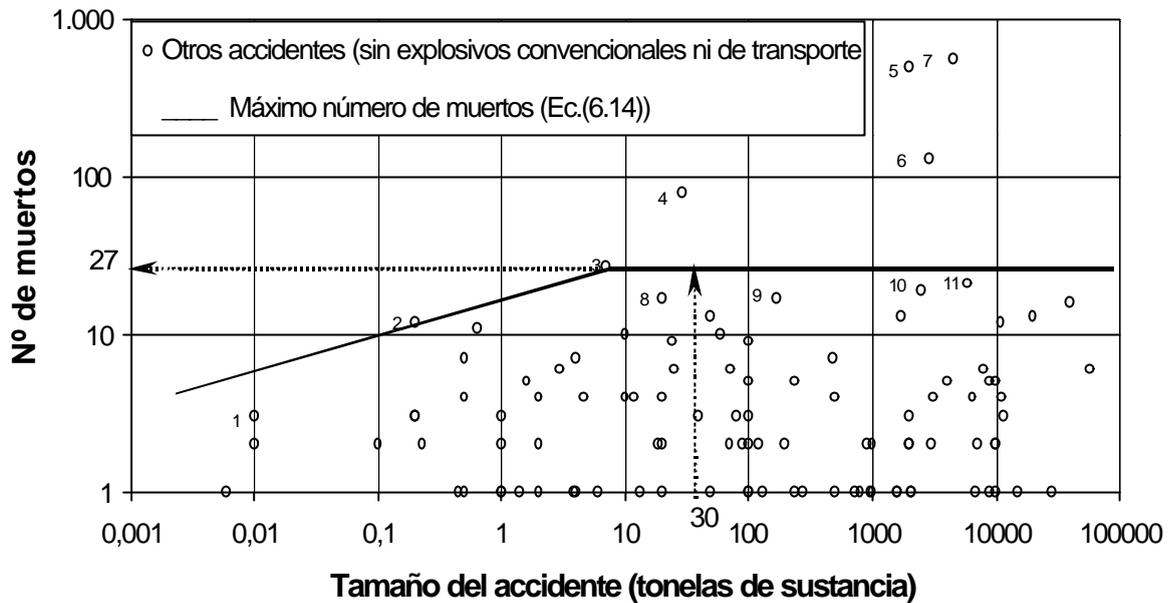
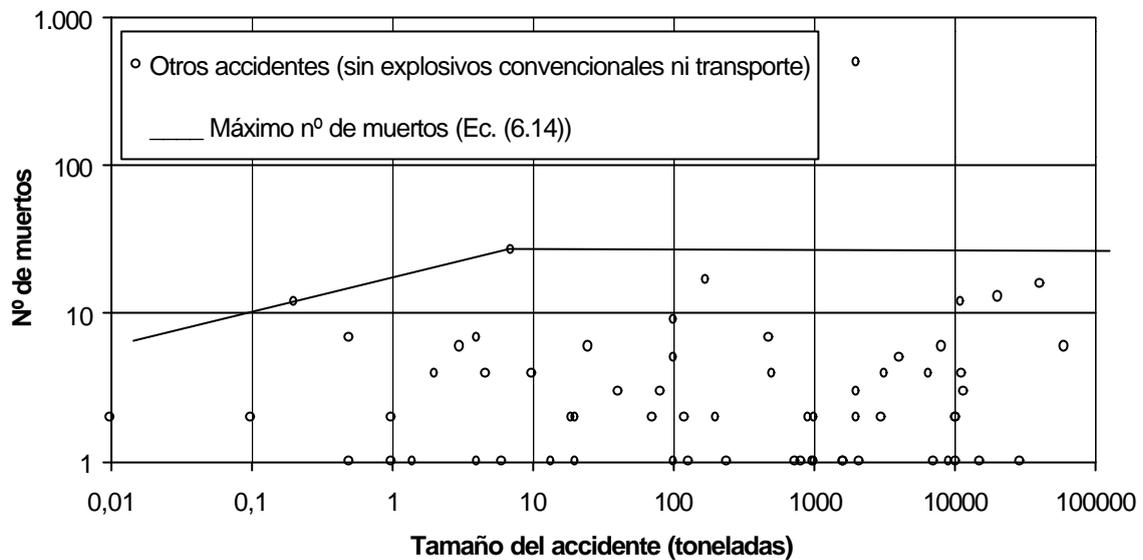


Tabla 6.5. Descripción de los accidentes referenciados en la Figura 6.9.

Ref.	Nº Accidente	Fecha/Localidad	Cantidad (t)	Nº de muertos	Actividad	Material
1	2576	23/08/1945 Portland/USA	0,01	3	Process	Al alloy Mixed nitrates
2	2114	16/12/1985 Glenwood S./USA	0,20	12	Process	Propane
3	6273	26/06/1993 Zhengzhou/China	7,00	27	Dom/com	Chemicals
4	1818	29/07/1943 Ludwigshaven/Germany	29,25	80	Storage	Nitrocelulose
5	0420	19/11/1984 S.Juanico/Mexico	2.000,00	500	Storage	LPG
6	1755	20/10/1944 Cleveland/USA	2.900,00	131	Storage	LNG
7	1668	29/09/1921 Oppau/Germany	4.572,00	561	Storage	Ammonium nitrate
8	1896	01/03/1924 New Brunswick/USA	20,32	17	Process	Ammonium Nitrate
9	2281	/07/1984 Chicago/USA	170,00	17	Process	Propane Monoethanolamine
10	2758	19/07/1956 Dumas/USA	2.480,00	19	Storage	Pentane Hexane
11	1157	04/01/1966 Feyzin/France	6.000,00	21	Storage	LPG

Figura 6.10. N° máximo de muertos en función de la cantidad de sustancia involucrada por accidentes ocurridos después de 1974.



Es oportuno destacar que para accidentes en los que han intervenido más de 7 toneladas, difícilmente se sobrepasan los 27 muertos, ya que mayoritariamente son accidentes que ocurren en parques de almacenamiento donde la densidad de población en el entorno es escasa, con lo que es difícil llegar a un número de muertos elevado.

$$\begin{cases} F_{\max} = 17.3 \times Q^{0.23} & \text{si } Q \leq 7 & (6.14.a) \\ F_{\max} = 27 & \text{si } Q > 7 & (6.14.b) \end{cases}$$

6.3.3. Distribución del número de muertos en función de F_{\max}

Mediante la Ec. (6.14) se puede estimar el número máximo de muertes que cabe esperar en una explosión accidental en función de la cantidad de sustancia que intervenga en la misma. No obstante, tan importante como conocer ese máximo es conocer la distribución de frecuencias de los accidentes con cierta gravedad, o lo que es lo mismo, con qué probabilidad se alcanzará un determinado porcentaje de F_{\max} .

Si se define la variable intermedia Z:

$$Z = \frac{F}{F_{\max}}$$

donde Z indica, para cada accidente, la relación que existe entre el número de muertos acaecido (número real de muertos en un accidente ocurrido o número estimado de muertos en un escenario accidental hipotético) y el máximo estimado mediante la Ec.

(6.14) (F_{max}), entonces es posible representar el porcentaje acumulado de casos ($C_{a\%}$) en los que se alcanza un determinado valor de Z (Tabla 6.6, Figura 6.11).

Tabla 6.6. % de casos acumulado vs Z. (Figura 6.11)

$Z=F_{real}/F_{max}$	Nº casos	Nº casos acumulado	% casos acumulado $C_{a\%}$
0,000	85	85	57,4
0,037	17	102	68,9
0,038	1	103	69,6
0,043	1	104	70,3
0,056	1	105	70,9
0,059	1	106	71,6
0,071	1	107	72,3
0,074	11	118	79,7
0,111	4	122	82,4
0,118	1	123	83,1
0,148	5	128	86,5
0,167	1	129	87,2
0,185	2	131	88,5
0,200	2	133	89,9
0,222	3	136	91,9
0,259	1	137	92,6
0,273	1	138	93,2
0,304	1	139	93,9
0,333	2	141	95,3
0,444	1	142	95,9
0,481	1	143	96,6
0,500	1	144	97,3
0,593	1	145	98,0
0,630	1	146	98,6
1,000	2	148	100,0
TOTAL	148	148	

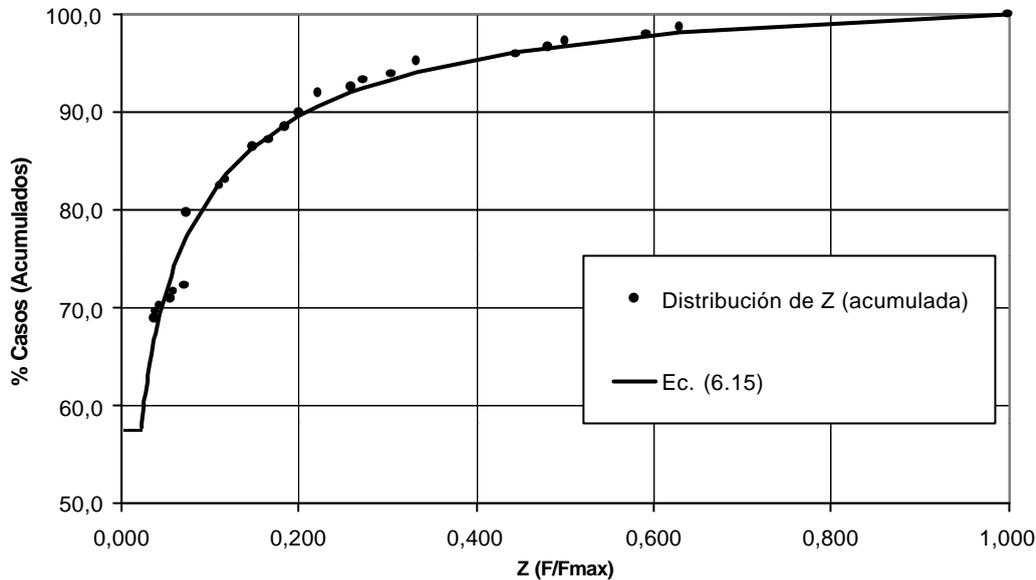
Para construir la Tabla 6.6, se ha calculado Z para cada accidente (columna 1); a continuación, en la columna 2, se ha indicado el número de accidentes en los que se ha obtenido un determinado valor de Z (ordenados de forma creciente) y en la columna 3, se indica el número de casos con una valor de Z igual o inferior. Finalmente, en la cuarta columna, se presenta el porcentaje que representa el valor de la columna 3 sobre el total de accidentes.

En la Figura 6.11 se ha representado este porcentaje frente a Z. Puede observarse que los puntos se sitúan con gran precisión sobre una curva. El mejor ajuste conseguido para la ecuación de esta línea es el correspondiente a la Ec. (6.15):

$$\left\{ \begin{array}{ll} C_{a\%} = 57.4 & \text{si } Z \leq 0.022 \quad (6.15.a) \\ C_{a\%} = -2.12 \times \ln^2 Z + 3.1 \times \ln Z + 100 & \text{si } Z > 0.022 \quad (6.15.b) \end{array} \right.$$

Donde $C_a\%$ es el porcentaje acumulado de casos con Z igual o inferior. El coeficiente de correlación para la segunda expresión es $R^2 = 0,979$.

Figura 6.11. Porcentaje de casos en los que se alcanza un determinado valor de Z .



En la Figura 6.11, el valor $C_{a\%} = 57,4\%$ correspondiente a la Ec. (6.15.a) representa el porcentaje de casos en los que no se produce ningún muerto. Teniendo en cuenta que, como pone de manifiesto la experiencia, los accidentes sin víctimas pueden estar infrarepresentados en la base de datos original, este valor supone un límite conservador, inferior al valor real.

6.3.4. Ejemplos de aplicación

Para apreciar la utilidad de los resultados obtenidos, supóngase una explosión en una instalación fija con una cierta frecuencia de ocurrencias por año de operación (dato que puede haberse obtenido, por ejemplo, mediante la técnica del árbol de fallos) y en la que intervengan 30 toneladas de sustancia (excluidos los explosivos convencionales). Con el método desarrollado, la dispersión respecto a la media calculada por la Ec. 6.13. puede ser cuantificada (los datos más relevantes se presentan en la Tabla 6.7).

Para construir esta tabla, se estima en primer lugar el máximo número de muertos esperable en una explosión en la que interviene esta cantidad de sustancia (Ec. 6.14), es decir, $F_{max} = 27$ muertos (ver Figura 6.10). En la primera columna de la Tabla 6.7 se indican las diversas cantidades de muertos (seleccionadas arbitrariamente), para los que se desea conocer con qué probabilidad se producirá un accidente con un número igual o inferior de fallecidos. A continuación, en la columna 2, se han calculado los valores de Z correspondientes y en la columna 3 se indica el porcentaje de casos acumulados en los que el número de muertos es igual o inferior (por ejemplo, 97,5% para $F=15$). Se ha incluido en esta tabla otro ejemplo, en este caso suponiendo un accidente en el que participan 2 toneladas de sustancia.

El resultado de aplicar esta metodología indicaría, por tanto, que en una explosión de 30 toneladas de sustancia podrían esperarse, como máximo, 27 muertos; que en el 98,9% de los casos no se producirían más de 20; que en el 94,8% de los casos se producirían 10 o menos muertes, etc. Obsérvese que el porcentaje de casos acumulados (columna 3 de la Tabla 6.7) está asociado al concepto de probabilidad de que se produzca un determinado número de muertes.

Tabla 6.7. Numero de muertos en función de Z (Figura 6.11).

Nº de muertos (F)	CASO 1: 30 toneladas F _{max} =27 muertos (Ec. (6.14))		CASO 2: 2 toneladas F _{max} =20 muertos (Ec. (6.14))	
	Z F/F _{max}	% casos (acumulados) (Ec. 6.15)	Z F/F _{max}	% casos (acumulados) (Ec. 6.15)
0	0	57,4	0	57,4
1	0,04	68,1	0,05	71,7
3	0,11	82,8	0,15	86,5
10	0,37	94,8	0,50	96,8
15	0,56	97,5	0,75	98,9
20	0,74	98,9	1,00	100,0
27	1,00	100,0	-	-

El proceso de cálculo implicaría las siguientes fases (Figura 6.12): a) definir un escenario accidental; b) estimar la frecuencia del evento; c) estimar la cantidad de sustancia involucrada en la explosión; d) Estimar el número máximo de muertos esperable según la Ec. (6.14); e) calcular el porcentaje de casos en los que el número de muertes será igual o inferior a un determinado valor (Ec. (6.15)), y f) estimar la frecuencia de un accidente con un cierto número de muertos.

6.3.5. Conclusiones

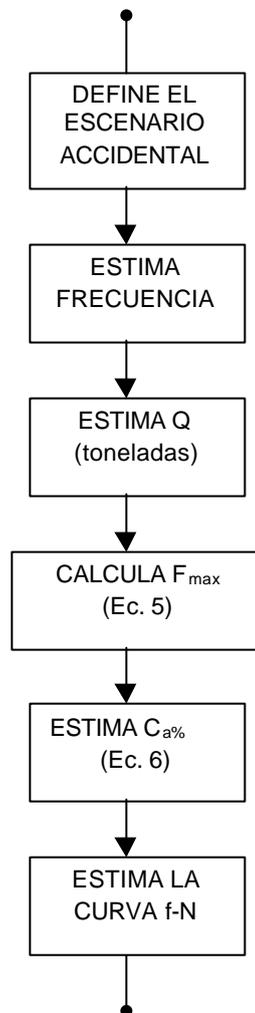
Las expresiones como la Ec. (6.12), propuesta por Marshall, tienen muy poca fiabilidad para predecir el número de muertos derivado de explosiones accidentales.

Una aproximación empírica con un mayor número de datos, basada en el análisis histórico de los accidentes de la base de datos MHIDAS, permite estimar un índice de mortalidad en función de la cantidad de sustancia explosionada. Sin embargo, su valor predictivo es muy escaso dada la gran dispersión de los datos; como primera aproximación es posible encontrar accidentes con un número de muertos diez veces superior al que se pueda predecir aplicando esta correlación promedio.

Para solventar este problema se propone un método, validado empíricamente a través de la base de datos MHIDAS, que permite calcular el número máximo de muertes (Ec. (6.14)) y la distribución de esta variable (Ec. (6.15)). Dicho método permite estimar la probabilidad de que se produzca un determinado número de muertos, si se conoce la frecuencia de ocurrencia de la explosión. Este resultado es útil para el análisis de riesgos al permitir valorar cuantitativamente la aceptabilidad o no de un riesgo. La curva presentada en la Figura 6.11 permite calcular una primera aproximación de las

curvas f-N [HAASTRUP 1990] asociadas a un escenario determinado, conociendo la frecuencia de ocurrencia del evento y la cantidad de sustancia inflamable involucrada.

Figura 6.12. Esquema del proceso de cálculo



6.4. DESARROLLO DE ÁRBOLES DE SUCESOS PARA SUSTANCIAS INFLAMABLES

Como se ha puesto de manifiesto sobradamente, el análisis histórico es una herramienta interesante para la obtención de información sobre los accidentes industriales tal como su origen, sus causas, su frecuencia o sus consecuencias. Además, puede ser utilizado para desarrollar o mejorar otras herramientas de análisis de riesgo como, por ejemplo, los árboles de sucesos.

Los árboles de sucesos son verdaderamente útiles para evaluar todos los posibles escenarios que se pueden derivar de un derrame o fuga, siendo una herramienta fundamental para el análisis cuantitativo de riesgos. Para su construcción son indispensables las bases de datos sobre accidentes y una correcta descripción de la secuencia de los eventos en un número de casos suficientemente representativo. De otra forma, los árboles de sucesos se reducen a una deducción cualitativa de

diferentes escenarios accidentales que deben ser considerados a partir de un evento dado.

En este apartado, la información contenida en la base de datos MHIDAS es utilizada para obtener árboles de sucesos para accidentes en los que se encuentra implicada alguna sustancia inflamable. La reducción sistemática de estos árboles a un número limitado de sucesos y el tratamiento cuantitativo de esta información ha permitido la obtención de las probabilidades de cada categoría o secuencia (ignición inmediata, ignición retardada, etc.)

Este trabajo muestra asimismo las limitaciones de la información habitualmente contenida en las bases de datos de accidentes, la cual podría ser mucho más útil si se incluyeran en las mismas más datos complementarios y mejor información cuantitativa.

6.4.1. Trabajos previos

Diversos autores han realizado el esfuerzo de obtener información cuantitativa relacionada con las posibilidades de accidente derivadas de una fuga de material inflamable. Muchos de ellos han analizado sistemas de LPG y algunos han extendido el estudio a otras sustancias inflamables [RHINE 1994].

Los posibles eventos finales derivados de una fuga de LPG generalmente considerados son los siguientes: BLEVE-Bola de fuego, llamarada, explosión de nube de vapor y dardo de fuego. Para otras sustancias inflamables también debe considerarse la posibilidad de fuegos en charco [GADD 1998].

Los árboles de sucesos desarrollados por la mayoría de los autores se basan en un número muy limitado de accidentes. En el estudio Canvey [CANVEY 1978], por ejemplo, se cita el estudio SAI que contempla 59 accidentes por fuga de pequeñas cantidades de LPG o líquidos inflamables y en el que se concluye que la ignición se produce con una probabilidad de 0,9. Otro estudio (Wilson), basado en 43 accidentes con fugas de entre 10 y 50 toneladas de gases y líquidos inflamables sugiere que la probabilidad de ignición de la nube en los primeros doscientos metros es de 0,8.

Las probabilidades de ignición estimadas por el informe Canvey para grandes fugas de LPG refrigerado o LNG tras un incidente en barcos de transporte se muestran en la Tabla 6.8.

Tabla 6.8. Probabilidad de ignición inmediata.

Probabilidad de	Tras una explosión o incendio	Tras una colisión
Ignición inmediata (menos de 30 s)	0,6	0,33
Ignición retardada (entre 30 s y pocos minutos)	0,3	0,33
Sin ignición	0,1	0,33

Para fugas de LPG presurizado puede esperarse una probabilidad de ignición inferior debido a la rápida formación de la nube de gas y su alejamiento de la instalación.

Por otra parte, el LPG Study [LPG 1983] establece una probabilidad de ignición por accidentes ocurridos en el transporte por ferrocarril de:

Tabla 6.9. Probabilidades de ignición según el LPG Study de TNO para el transporte por ferrocarril.

Escenario	Probabilidad de ignición directa	Probabilidad de ignición retardada	Probabilidad de no ignición
Rotura de tubería u orificio	0,1	0,05	0,85
Fuga instantánea en un tanque	0,8	0,2	0,02

Mientras que para el transporte por carretera los valores estimados son los mostrados en la Tabla 6.10.

Tabla 6.10. Probabilidades de ignición según el LPG Study de TNO para transporte por carretera

escenario	Probabilidad de ignición directa	Probabilidad de ignición retardada	Probabilidad de no ignición
Rotura de tubería u orificio	0,1	0,05	0,85
Fuga instantánea en un tanque	0,4	0,5	0,1

Sin embargo, Tiemessen [TIEMESSEN 1998] establece la probabilidad de ignición en 0,0156 para gases inflamables utilizando estadísticas de accidentes de transporte del periodo 1978-1993.

En las “Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Assessment” [CCPS-AICHE 1989], la probabilidad de ignición directa para instalaciones fijas para un líquido de categoría K1, gas poco reactivo o gas altamente reactivo, en función de la cantidad de sustancia fugada es la mostrada en la Tabla 6.11.

Tabla 6.11. Probabilidad de ignición en función de la cantidad de sustancia fugada.

Fuga continua	Fuga instantánea	Líquido K1	Gas poco reactivo	Gas de reactividad media o alta
<10 kg/s	<1.000 kg	0,065	0,02	0,2
10-100 kg/s	1.000-10.000 kg	0,065	0,04	0,5
>100 kg/s	>10.000 kg	0,065	0,09	0,7

En los párrafos siguientes se presenta una evaluación alternativa de estas probabilidades utilizando los accidentes recopilados en la base de datos MHIDAS [CAROL 2001-1]. Un estudio preliminar de esta metodología fue desarrollado anteriormente por Vilchez [VILCHEZ 1996].

6.4.2. Metodología

Se seleccionaron de MHIDAS accidentes que hubieran implicado, al menos, una sustancia inflamable, excluyendo todos los accidentes clasificados como de transporte con el fin de obtener resultados válidos para instalaciones fijas. En una segunda fase, se depuraron los accidentes seleccionados, eliminado aquellos en los que la sustancia involucrada no estaba claramente identificada (“Chemicals”, “Others”,...). Tras este proceso, quedaron 580 accidentes seleccionados.

Las sustancias identificadas en este conjunto son: Metano, etano, propano, butano, isobutano, pentano, hexano, heptano, octano, etileno, LNG, LPG, gasolina y keroseno. En algunos casos, el accidente implica dos o más sustancias de las anteriores simultáneamente.

Utilizando el contenido del campo ABSTRACT de cada registro, se ha establecido la secuencia de ocurrencia. A falta de mayor información sobre el accidente, se ha aceptado la descripción hecha en el campo "Incident Type" de MHIDAS. En este campo es posible encontrar cuatro palabras clave para describir la secuencia del accidente: EXPLOSIÓN, INCENDIO, FUGA O NUBE DE GAS. Se ha empleado la misma terminología en este estudio con el fin de simplificar la descripción de la secuencia del accidente.

6.4.3. Resultados

El árbol de sucesos general obtenido a partir de los 580 accidentes seleccionados es el presentado en la Figura 6.13. En los accidentes considerados aparecen tres eventos principales: Explosión, Incendio y Derrame (o Fuga). Cada uno de ellos puede dividirse en subcategorías: explosión incluyendo incendio, incendio incluyendo explosión y fuga (pudiendo incluir explosión y/o incendio, o nube de gas (con explosión e incendio).

La probabilidad de ocurrencia se muestra en cada categoría, así como el número de accidentes de cada una de ellas (entre paréntesis).

Con el fin de obtener un árbol general simplificado, se han introducido los siguientes cambios:

1. Eventos clasificados sólo como explosión o incendio pertenecen muy probablemente al evento fuga-explosión o fuga-incendio. Se asume por tanto que todos los accidentes se inician por un evento fuga.
2. Se asume también que las explosiones van siempre seguidas de incendio mientras que explosiones a continuación de incendios reflejan, por lo general, efectos dominó.
3. Se agrupan en una misma categoría las secuencias nube de gas-explosión y nube de gas- incendio.

Con estos cambios, el árbol de sucesos simplificado que resulta se muestra en la Figura 6.14. Es importante tener en cuenta que los accidentes sin explosión ni incendio están claramente infrarepresentados en la muestra, ya que suelen ser accidentes sin muertes y esta tipología está infravalorada en la base de datos original.

El árbol de sucesos presentado en la Figura 6.14 muestra que los accidentes "sin ignición" tienen una probabilidad de 0,148, frente a una probabilidad del 0,852 para accidentes con "EXPLOSIÓN" y/o "INCENDIO". Asumiendo que sólo los accidentes con "NUBE DE GAS" ocurren tras una ignición retardada, es posible estimar una probabilidad del 0,095 y del 0,757 para la ignición retardada o inmediata respectivamente.

Figura 6.13. Árbol de sucesos general para sustancias inflamables.

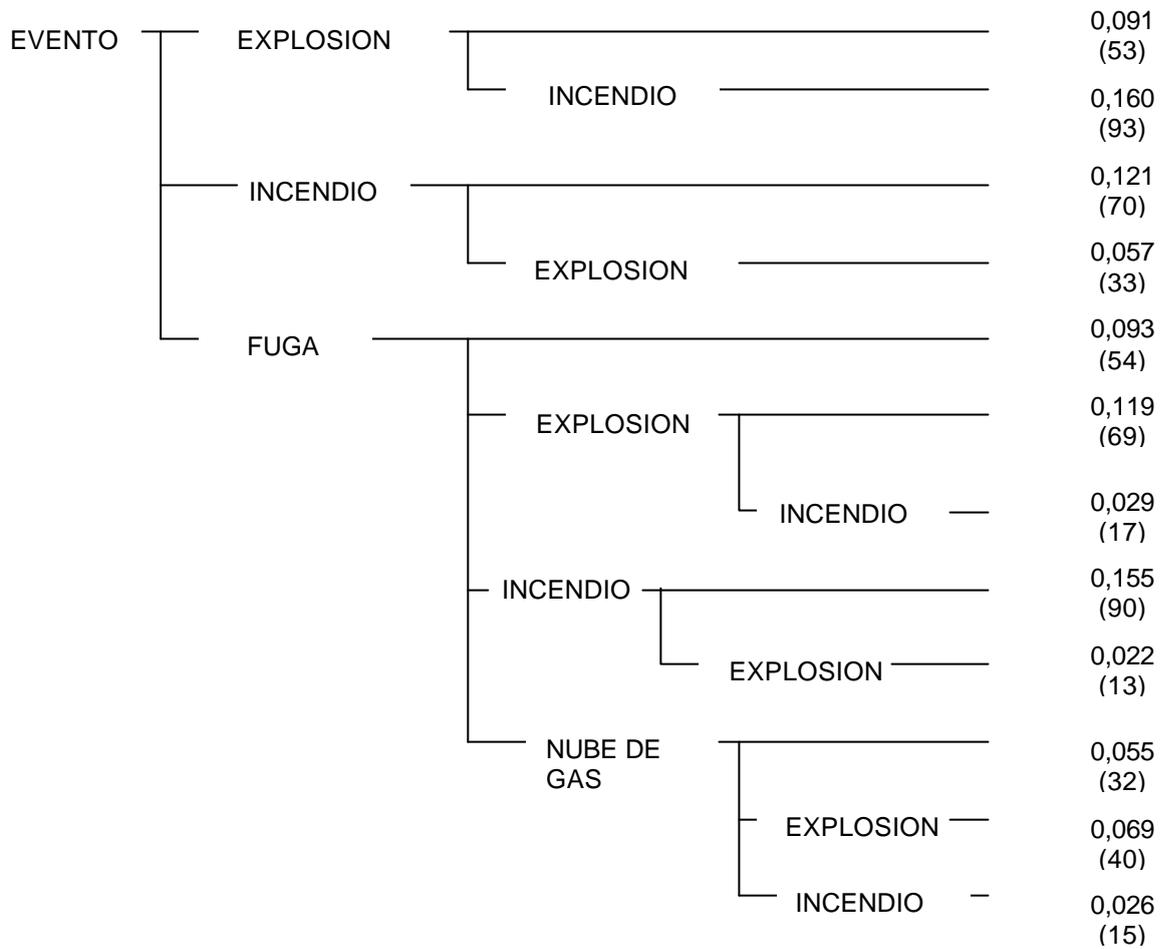


Fig. 6.14. Árbol de sucesos simplificado (general).

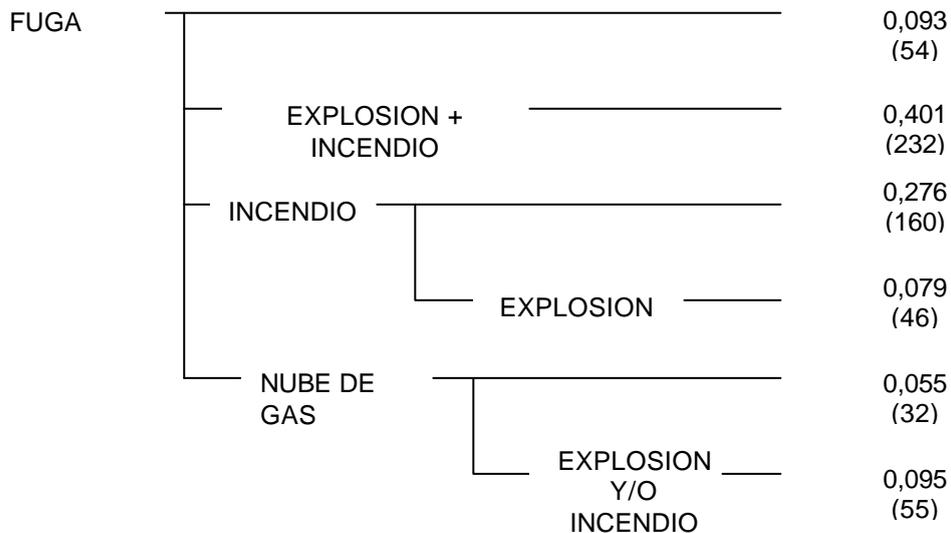
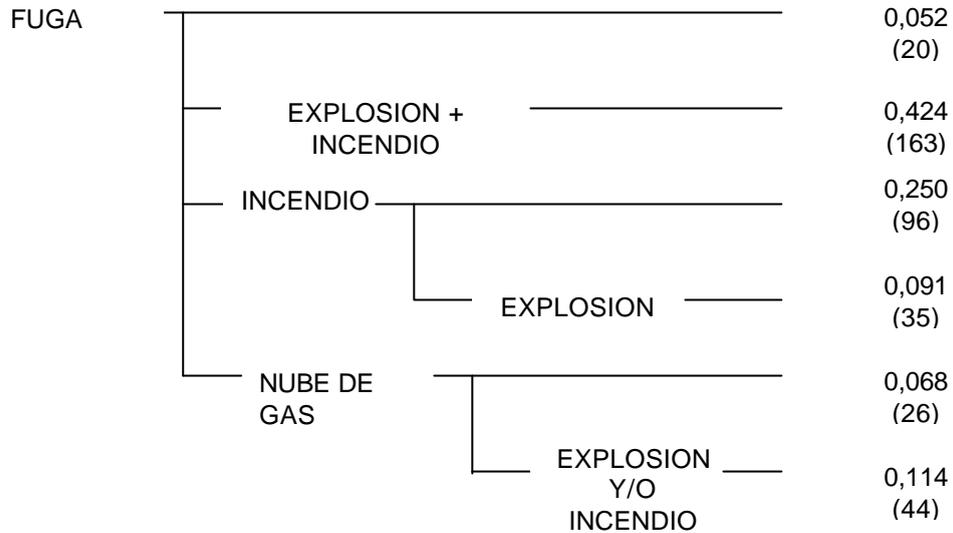


Fig. 6.15. Árbol de sucesos simplificado para sustancias gaseosas (384 casos).



En el mismo sentido, otros árboles de sucesos para gases (Fig. 6.15) o líquidos (Fig. 6.16) pueden ser desarrollados con el fin de analizar sus diferencias y determinar las respectivas probabilidades.

Para gases, con 384 casos, la probabilidad de un accidente sin ignición es de 0,12 (0,052 + 0,068) mientras que para líquidos es del 0,20. Evidentemente es mucho más probable la ignición de una sustancia gaseosa que de una sustancia en estado líquido.

De la misma manera, la probabilidad de ignición retardada para gases es de 0,114 frente a un 0,06 para líquidos. La probabilidad de ignición inmediata para gases es de 0,766 frente a un 0,74 para líquidos.

Pueden obtenerse también otros árboles de sucesos utilizando el campo "ORIGEN" de la base de datos MHIDAS. En dicho campo hay tres importantes palabras clave: "PROCESS", para accidentes ocurridos en instalaciones de proceso químico; "STORAGE" para operaciones o áreas de almacenamiento en planta o "TRANSFER", para operaciones de carga o descarga. Para estos grupos de accidentes, los árboles de sucesos obtenidos se presentan en las figuras 6.17 a 6.19 respectivamente.

Para estos grupos, las probabilidades estimadas para la ignición inmediata, retardada o "no ignición" se presentan en la Tabla 6.12.

Tabla 6.12. Probabilidades de ocurrencia en función de la actividad.

Actividad	Prob. de ignición inmediata	Prob. de ignición retardada	Prob. de no ignición
Proceso	0,85	0,10	0,06
Almacenamiento	0,73	0,09	0,18
Carga/descarga	0,67	0,14	0,19

Fig. 6.16. Árbol de sucesos simplificado para líquidos (150 casos).

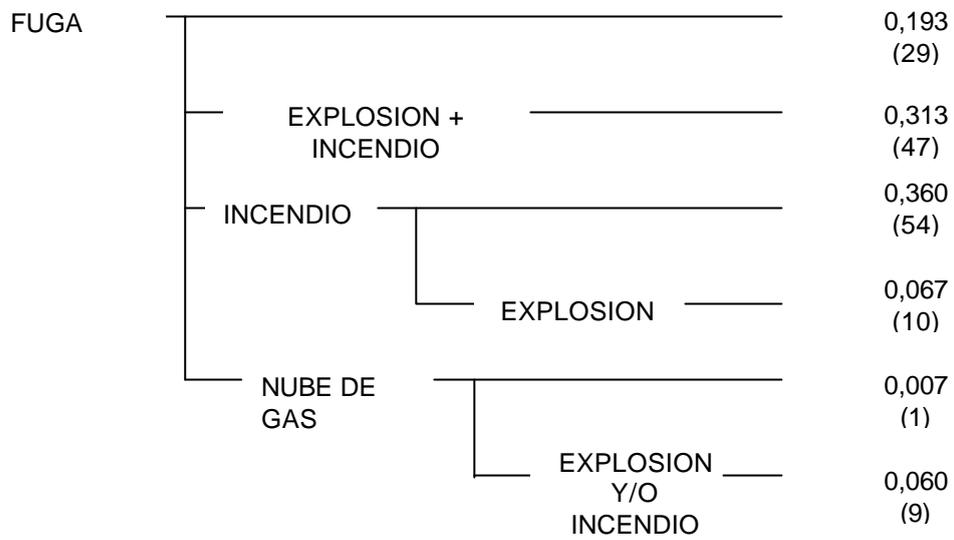


Fig. 6.17. Árbol de sucesos simplificado para accidentes en instalaciones de proceso (200 casos).

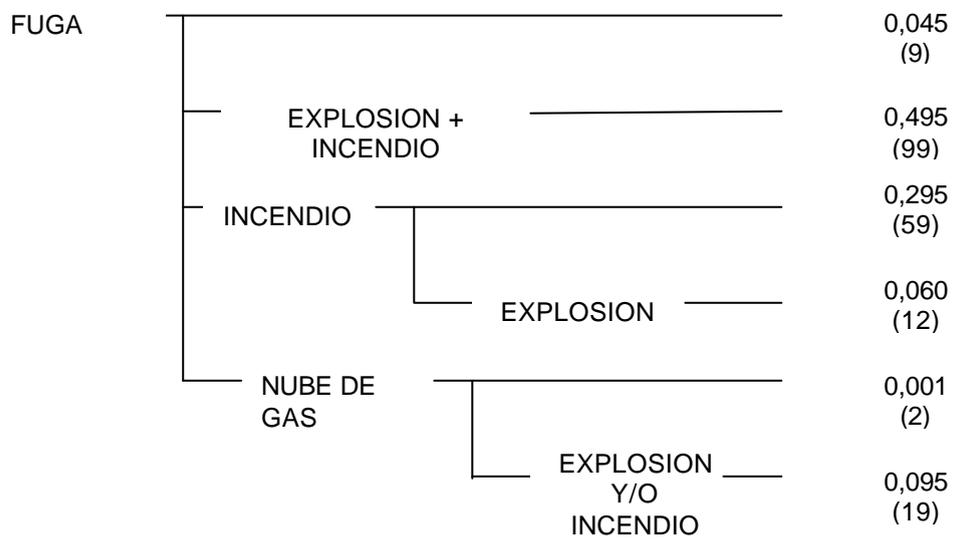


Fig. 6.18. Árbol de sucesos simplificado para accidentes en áreas de almacenamiento (182 casos)

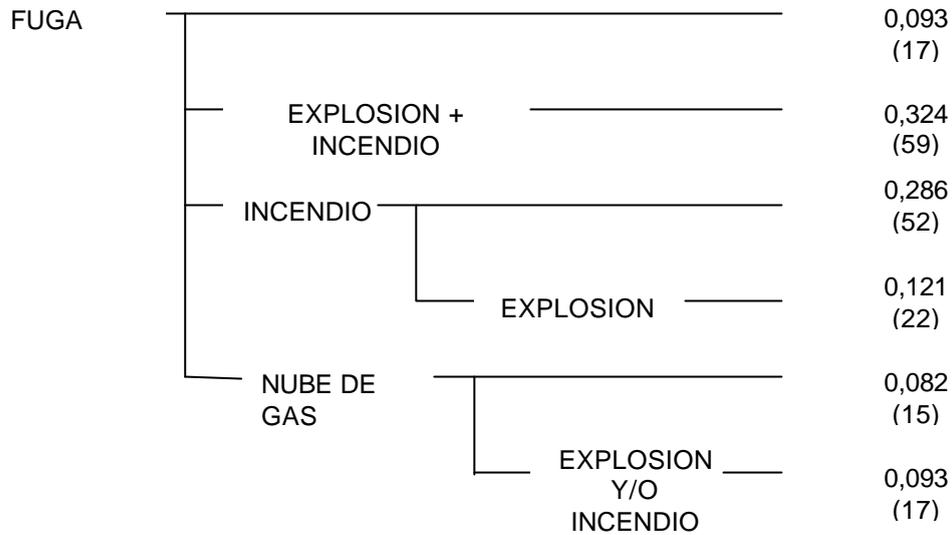
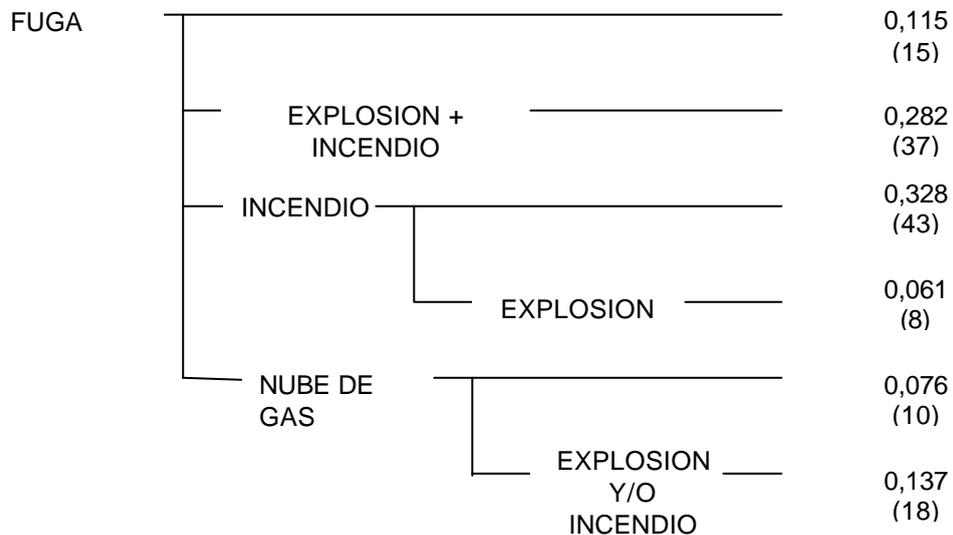


Fig. 6.19. Árbol de sucesos simplificado para accidentes en operaciones de carga o descarga (131 casos).



6.4.4. Conclusiones

Como ha sido comentado en secciones previas, utilizando bases de datos sobre accidentes es posible determinar las diversas secuencias de eventos que conducen al accidente y estimar sus probabilidades de ocurrencia. Desafortunadamente, el número de registros disponibles con información completa y abundante es muy reducido y la descripción de su evolución utilizando palabras clave es muy limitada. Es importante considerar que de disponer de mejor y más abundante información, sería posible obtener resultados más precisos. Con el fin de mejorar esta información sería muy conveniente almacenar algunos datos altamente significativos, tales como el estado

físico de la sustancia, cantidad involucrada en el accidente, forma de la fuga o escape, tiempo transcurrido hasta la ignición, efecto dominó (si procede), etc.

A pesar de que la información disponible en MHIDAS es limitada y considerando también que los accidentes sin víctimas mortales están infrarepresentados, es posible utilizar la información recopilada para obtener árboles de sucesos correspondientes a accidentes con sustancias inflamables y estimar las diferentes probabilidades de ocurrencia de cada categoría o secuencia.

De hecho, la literatura citada en este apartado presenta resultados similares (del mismo orden de magnitud) para las probabilidades de ocurrencia que las obtenidas utilizando los accidentes registrados en MHIDAS.

6.5. CONCLUSIÓN

Los tres estudios presentados en este capítulo constituyen un ejemplo de las posibilidades que ofrece el tratamiento cuantitativo del análisis histórico de accidentes aplicado a determinados conjuntos de datos con cierta homogeneidad entre sí. Los resultados logrados permiten suponer que aplicaciones similares sobre otros datos pueden aportar nuevas e interesantes conclusiones.

Lamentablemente, como ha podido apreciarse en los tres estudios presentados, los datos disponibles para llevar a cabo este tipo de análisis son verdaderamente escasos y limitados. Generalizar estas técnicas a, por ejemplo, derrames o fugas de ciertas sustancias resulta prácticamente inviable habida cuenta de la escasez de información al respecto.

Tanto el análisis de los índices de riesgo disponibles para la industria química presentado en el Capítulo 2 como las referencias a las bases de datos y otras fuentes de información disponibles sobre accidentes con sustancias peligrosas (Capítulo 3) han puesto de manifiesto que las variables o factores que influyen de manera significativa en la gravedad de un accidente son múltiples y difíciles de conocer tras la ocurrencia del siniestro. Prácticamente ninguna de estas variables está recogida en la base de datos MHIDAS, que resulta extremadamente cualitativa y muy limitada para el desarrollo de los estudios que en este capítulo han sido presentados.