

Evaluación de consecuencias medioambientales de accidentes graves (Seveso II)



ÓSCAR ESTRADA LARA
Licenciado en C.C. Ambientales
Departamento de Medio Ambiente

PEDRO SORIA GARCÍA RAMOS
Ingeniero Industrial
Director técnico

ITSEMAP Servicios Tecnológicos
MAPFRE S. A.

SUMARIO

La Directiva Seveso II desarrolla las políticas encaminadas a la prevención de accidentes graves en actividades industriales con sustancias peligrosas y a la reducción de sus consecuencias para las personas, los bienes y el medio ambiente. En éste último ámbito, los requisitos derivados de la aplicación de la misma en materia de análisis de las consecuencias encuentran limitaciones por causa de la complejidad de los procesos de transporte y mecanismos de afectación del medio ambiente. En el artículo se esboza el desarrollo de una metodología que, aplicando la norma UNE 150 008 EX persigue la objetivación de los parámetros contemplados en la misma – cantidad de sustancia, peligrosidad, extensión y calidad del medio – considerando las diferentes naturalezas del transporte y la afección en diferentes ámbitos que componen el medio natural (suelo, atmósfera y aguas).

Palabras clave: Accidentes graves, medio ambiente, sustancias peligrosas.

INTRODUCCIÓN

Como «riesgo medioambiental» puede entenderse una gama muy diversa de circunstancias que pueden suponer un daño desde la actividad humana sobre el medio ambiente (p.e. contaminación del aire), desde el medio ambiente sobre la actividad humana (por ejemplo, efectos derivados del calentamiento del planeta) o, incluso, como una «amenaza» a las actividades humanas por causas medioambientales (por ejemplo desfase de determinados procesos o productos en relación con las mejores tecnologías disponibles en relación con el medio ambiente).

A su vez el riesgo con consecuencias sobre el medio ambiente ocasionado por una actividad tiene dos vertientes: por un lado, el impacto gradual de la actividad, por causas crónicas (emisiones, residuos, etc.), y, por el otro, el impacto súbito por causa accidental.

El primero de ellos cuenta con un cuerpo reglamentario que permite, en una fracción relevante de actividades, mantener «controlado» el riesgo medioambiental, mientras que en el segundo existen situaciones, que con cierta frecuencia provocan alarma social, en las que se sobrepasa la capacidad de la sociedad para prevenir el accidente y para evitar sus consecuencias (Tabla 1).

Para este último caso, la mayoría de las naciones industrializadas cuentan con reglamentaciones tendentes a limitar o controlar el riesgo «accidental» sobre el medio ambiente a través de sistemas de gestión que, mediante la utilización de modelos de análisis más o menos estructurados, «aseguren» la fortaleza de todos los eslabones de la cadena (concepción, diseño, construcción, operación, mantenimiento, modificaciones, desmantelamiento, respuesta a emergencias...).

En lo que respecta al riesgo sobre las personas, hace ya décadas que se utilizan metodologías de cálculo (análisis cuantitativo del riesgo, ACR) que permiten, aun con incertidumbres, estimar el riesgo sobre la base de eventos con valores asociados de frecuencia (normalmente anual) y consecuencias (normalmente víctimas

mortales). Y ello ha permitido su utilización como herramienta de gestión (jerarquización de riesgos y análisis coste-beneficio) y como base para la aplicación de criterios cuantitativos de aceptabilidad del riesgo.

Sin embargo, a la hora de evaluar el riesgo para el entorno natural por causa accidental, si bien en lo que se refiere a la estimación de las frecuencias se cuenta con las mismas metodologías y herramientas, no se ha llegado a la definición de metodologías que, con un reconocimiento generalizado, establezcan criterios con suficientes dosis de objetividad y universalidad.

LA DIRECTIVA 96/82/CE (SEVESO II)

En el ámbito europeo, la Directiva 96/82/CE del Consejo de 9 de diciembre de 1996 relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, emanada de artículos del Tratado Constitutivo de la Comunidad Europea referentes a políticas en materia de medio ambiente, establece como objeto de la misma «la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias con la finalidad de proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente», así como la obligación para el industrial de disponer y aplicar procedimientos para *identificar los riesgos de accidentes graves y evaluar sus consecuencias*.

Se establece, por tanto, una delimitación de ámbitos en lo que se refiere a los potenciales «pacientes» de los daños, diferenciando el «medio ambiente» de las personas y los bienes.

En el desarrollo reglamentario derivado de la transposición de dicha Directiva a la legislación española (R.D. 1254/1999 y Directriz Básica de Protección Civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, esta última pendiente de publicación) se contempla, en lo que se refiere al «Análisis de la vulnerabilidad para el medio ambiente», la aplicación de una metodología que se base en la *evaluación y parametrización de los cuatro componentes que constituyen el sistema de riesgo*:

1. Fuentes de riesgo.
2. Sistemas de control primario.
3. Sistemas de transporte.
4. Receptores vulnerables.

En la publicación de la Dirección General de Protección Civil del Ministerio del Interior¹ se concluye, tras el estudio de la viabilidad del análisis detallado de los mecanismos de transporte y vulnerabilidad, que *pueda ser técnica y económicamente difícil de abordar en el ámbito y objeto de los informes de seguridad de establecimientos Seveso II*, proponiendo que se tengan en cuenta los componentes señalados anteriormente sobre la base de una metodología que permita evaluar el impacto sobre los medios receptores, tanto para la gestión del

TABLA 1. Desastres ecológicos y las principales sustancias peligrosas involucradas.

Accidente (año)	Sustancia	Descripción
«Petrolero Metula», estrecho de Magallanes, 1974	Petróleo	Transportaba más de 190.000 toneladas de petróleo crudo, de las cuales, aproximadamente, unas 53.000 fueron vertidas.
Seveso, Italia, 1976	Dioxinas	Salida a la atmósfera de un kilogramo de Dioxinas (estimado).
«Exxon Valdez», Alaska, 1989	Petróleo	Vertido al mar de 38 800 toneladas de petróleo.
Aznalcóllar, Sevilla, 1998	Metales pesados en aguas ácidas	Vertido total de 6 hm ³ de lodos y agua ácida, con elevadas concentraciones de metales pesados.
«Mar Egeo», Galicia, 1992	Petróleo	En diciembre de 1992, el petrolero «Mar Egeo» encalló frente a la costa de La Coruña, produciendo una marea negra sobre las costas.
Aurul Baja Mare, Danubio, Rumanía, 2000	Cianuros	Vertido de unos 368.500 litros con un contenido de cianuro 700 veces más alto de los valores permitidos por la legislación.
Basilea, Suiza. 1986	Diversos productos farmacéuticos	Los vertidos de extinción dan lugar a procesos de contaminación aguda del Rhin.
«Prestige», Galicia. 2002	Petróleo	El buque Prestige se hunde frente a las costas de Finisterre con una carga aproximada de 60.000 toneladas de fuel.



La protección del medio ambiente es un asunto clave en el desarrollo de legislación a nivel europeo. La inclusión de la valoración de consecuencias medioambientales en las evaluaciones de riesgos industriales constituye un paso más en esta dirección.

riesgo como para la planificación de emergencias, no sólo para el industrial, sino también para la autoridad competente.

REQUISITOS ESENCIALES PARA UNA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE CONSECUENCIAS MEDIOAMBIENTALES

A la hora de abordar la evaluación de las consecuencias para el medio ambiente en el marco de la Directiva Seveso II en ITSEMAP, Departamento de Medio Ambiente y Área de Seguridad Industrial, se partió de la necesidad de satisfacer de forma equilibrada las siguientes cualidades:

- Desarrollo sobre una **base metodológica** reconocida.
- **Acotación** del ámbito de actuación a los efectos tóxicos de la liberación directa o indirecta, de sustancias peligrosas sobre el entorno natural, entendiendo como tal el suelo, las aguas, el aire y, dentro de ellos, la flora y la fauna y el aprovechamiento que de dicho entorno realiza el ser humano (turismo, agricultura, pesca, etc.). Las consecuencias directas sobre el ser humano y los bienes por él contruidos se entienden cubiertas por metodologías asentadas de mayor desarrollo. Quedarían fuera del alcance los efectos térmicos y mecá-

nicos sobre el entorno natural de incendios y explosiones, sin que esto se considere una limitación relevante (accidentes de este tipo no han tenido la repercusión sobre el entorno natural que han tenido los debidos a derrames de sustancias nocivas para el medio ambiente).

- **Objetividad.** De manera que los resultados sean, dentro de lo posible, independientes del técnico que efectúa la evaluación, mediante la parametrización cuantificada de las variables intervinientes.

- **Universalidad.** Dentro del ámbito del riesgo «accidental», de manera que puedan englobarse y tenerse en cuenta la amplia variedad de características de sustancias, de tipologías de actividades y de medios receptores.

- **Escalabilidad.** De forma que la parametrización de cada una de las variables y las de éstas entre sí guarden relaciones que permitan la interpretación cuantitativa de los resultados.

- **Especificidad.** Contemplando las singularidades del transporte de las sustancias contaminantes y su impacto en cada uno de los posibles medios receptores

- **Disponibilidad.** Utilizando propiedades o características de sustancias disponibles en la literatura científica y bases de datos, modelos físicos asequibles y adecuados al objeto del estudio, etc.

- **Trazabilidad.** Permitiendo el seguimiento y la revisión a lo largo de todo el proceso de análisis.

- **Inteligibilidad.** De forma que el proceso de análisis e interpretación de resultados sea comprensible por personal no especialista en las metodologías empleadas para el análisis.

LA NORMA UNE 150 008 EX

La norma UNE 150 008 EX *Análisis y evaluación del riesgo medioambiental*, elaborada por el Comité Técnico 150 Gestión Medioambiental de AENOR, define un proceso para especificar criterios de identificación, análisis y evaluación del riesgo medioambiental, definido éste como el caso particular del riesgo en el que se valora el peligro de causar daños al medio ambiente, o a las personas o a los bienes, como consecuencia del daño al medio ambiente.

Para ello define un proceso analítico de la actividad de la empresa, encaminados a identificar y a evaluar las fuentes de riesgo medioambiental, tanto en lo que se refiere a las señaladas anteriormente como «crónicas» como a las denotadas como «accidentales».

En lo que respecta al objeto del presente artículo, la valoración de las consecuencias sobre el entorno natural de eventos accidentales se presenta un proceso de valoración «screening», aplicando la siguiente fórmula:

$$\text{Gravedad sobre el entorno natural} = \text{Cantidad} + 2 \times \text{Peligrosidad} + \text{Extensión} + \text{Calidad del medio}$$

Para cada uno de los cuatro elementos considerados para la evaluación de la gravedad se establece una valoración de 1 a 4 sobre la base de consideraciones, en cierta manera, subjetivas (por ejemplo, cantidad emitida sobre el entorno *muy alta*, sustancia *poco peligrosa*, espacio de influencia del impacto en relación al entorno *extenso*, calidad del medio *elevada*).

De esta manera se obtendría una valoración de la gravedad de las consecuencias (entre 5 y 20) de acuerdo con lo siguiente:

- Crítico 20-18
- Grave 17-15
- Moderado 14-11
- Leve 10-8
- No relevante 7-5

Así, para la valoración de los elementos a considerar señalados en la Directriz básica de Protección Civil para el control y planificación ante el

riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, esta norma aporta los siguientes elementos:

- El rango de cada uno de los índices oscila entre 1 y 4.
- El índice representativo del daño se obtiene como la suma de cada uno

uno de las características del evento accidental.

A_j Constante dependiente de cada característica cuya misión es ajustar las unidades empleadas en la definición de la variable representativa y devolver un valor del índice, en un rango razonable de la variable considerada, entre 1 y 4.

B Coeficiente cuya misión es ajustar el rango de valores abarcado entre los valores del índice señalados (1 a 4). Este coeficiente, con el fin de cumplir el requisito de escalabilidad debería ser el mismo para todos los índices.

V_j Variable representativa de cada una de las características del evento accidental.

TABLA 2. Correspondencias entre la Directriz básica de Protección Civil para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves y la Norma UNE 150 008 EX.

1. Fuentes de riesgo.	Peligrosidad de la sustancia e inventario máximo de sustancia.
2. Sistemas de control primario.	Inventario de sustancia liberada al entorno.
3. Sistemas de transporte.	Distribución de la sustancia en los diferentes medios y extensión.
4. Receptores vulnerables.	Calidad del medio

Por tanto, se considera que la metodología señalada en esta norma para la evaluación del daño al entorno natural puede representar un punto de partida válido, sobre el que se apliquen los criterios necesarios para dar cumplimiento a los requisitos esenciales señalados anteriormente.

CRITERIOS DE APLICACIÓN

De la descripción de los criterios de aplicación de la norma señalada se pueden sacar las siguientes conclusiones:

de los índices (dos veces el de peligrosidad de la sustancia).

De ambas observaciones se extrae que cada uno de los índices y su suma representarían órdenes de magnitud de las variables físicas representativas de los mismos.

De esta forma el valor de un índice podría expresarse como:

$$I_j = A_j + B * \log V_j$$

Donde,

I_j Valor del índice asociado a cada

La aplicación de este criterio supone que:

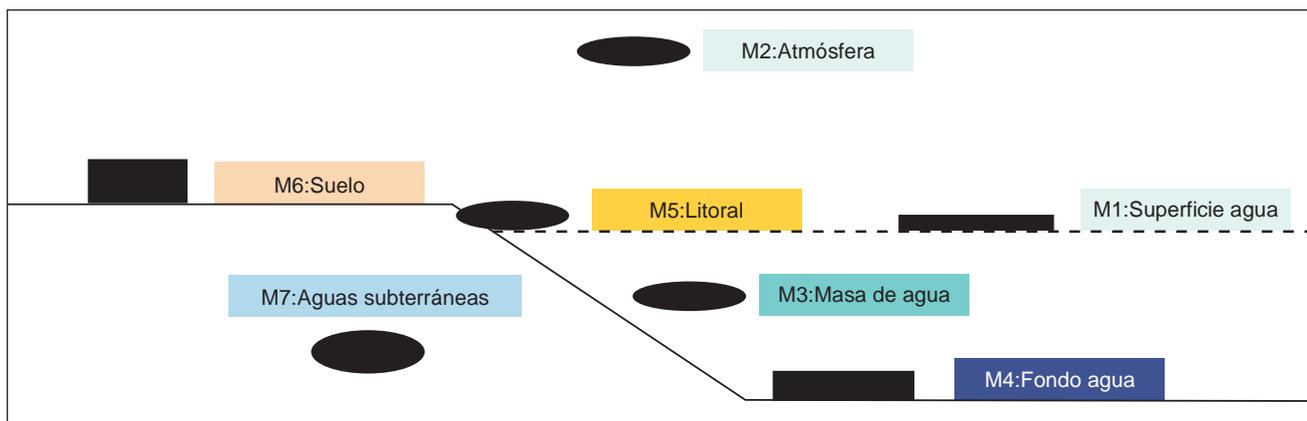
- Podrán existir valores de índices no enteros, lo cual, en principio, no supone una limitación.

- Podrán existir valores de los índices fuera del rango señalado (menores que 1 o mayores que 4) en aquella(s) característica(s) que tengan mayor variabilidad, sin que suponga tampoco una limitación, siempre que en cada índice los valores de las variables que correspondan con los extremos del intervalo supongan valores «razonables». Por razón de que una relación de 1000 supone para la ma-



Determinados procesos industriales pueden dar lugar a reacciones no controladas que provoquen la emisión de sustancias altamente peligrosas para el medio ambiente.

FIGURA 1. Identificación de potenciales medios receptores.



yoría de los casos un intervalo que abarca un intervalo razonable y por suponer un reflejo más intuitivo de la diferencia entre índices, se ha considerado adecuado disponer un valor de $B=1$, de forma que, por ejemplo, una diferencia de índices de 1 supondría una gravedad de daño 10 veces superior.

Por otro lado, nos encontramos con el hecho de que las características de las sustancias (volatilidad, solubilidad en agua, densidad, etc.), los mecanismos de transporte (suelos, aire, agua, etc.) y la afección al entorno natural (ingestión o contacto de sustancia, inhalación, disolución en el medio, etc.) difieren de un medio a otro.

Ello impide el establecimiento de variables y coeficientes «universales» de acuerdo con los requisitos indicados anteriormente.

Por ello se ha considerado analizar por separado los efectos en los siguientes medios:

– **M1. Superficie del agua.** El análisis de este medio permite valorar las consecuencias de la presencia de una determinada sustancia en la superficie de la lámina de agua.

– **M2. Atmósfera.** Se analizan las consecuencias asociadas a la presencia de un contaminante en la atmósfera de forma directa o indirecta por la emisión directa o evaporación de una sustancia.

– **M3. Masa del agua.** Permite valorar el efecto de las sustancias que van a quedar disueltas en la masa del agua que se define como el volumen de agua comprendido entre la superficie de la lámina de agua y el fondo.

– **M4. Fondo del agua.** Se analizan las consecuencias asociadas a la deposición de sustancias en el fondo de la masa de agua y su interacción con los elementos naturales del mismo.

– **M5. Litoral.** Permite valorar los efectos de la entrada de una sustancia en la zona litoral, que se define como la interfase entre el suelo, la atmósfera y la masa de agua. Su extensión está condicionada por el cambio de nivel de las aguas superficiales presentes en la zona y por la orografía local.

– **M6. Suelo.** Se analizan los efectos sobre el sistema suelo y sobre la fauna y flora soportada por el mismo.

– **M7. Aguas subterráneas.** Se analiza el daño provocado a los acuíferos ubicados en la zona en atención a su potencial aprovechamiento.

La aplicación de esta separación de medios hará necesarios ajustes de forma que hagan equivalentes los índices de gravedad del daño medioambiental en diferentes medios.

De esta forma el valor de la gravedad del daño se obtendría a partir de la siguiente expresión:

$$IG_T = \log (\sum_{medios} (10^{G_i}))$$

Donde

IG_T : Índice de gravedad total

\sum_{medios} : Suma para todos los medios afectados

IG_i : Índice de gravedad en el medio «i».

DETERMINACIÓN DE VARIABLES A CONSIDERAR

Índices de cantidad:

La cantidad de entrada a un medio receptor dependerá de las propiedades físicoquímicas del medio, de la sustancia involucrada y del lugar en el que se ubique cada escenario de riesgo. De manera general, la entrada directa de una sustancia ajena al medio puede ser al agua, al suelo o a la atmósfera. La posterior distribución de la masa de las sustancias en cada medio receptor va a depender de las propiedades del medio y de las sustancias; entre éstas, forma física, solubilidad, densidad, presión de vapor, etc.

Así, los índices de cantidad para cada medio se obtendrán de la siguiente expresión:

$$I_{Q_i} = A_{Q_i} + \log (Q_i)$$

Donde

I_{Q_i} : Índice de cantidad.

i : Denota cada uno de los medios.

Q_i : Cantidad de una determinada sustancia que entra en el medio i .

El riesgo con consecuencias sobre el medioambiente ocasionado por una actividad tiene dos vertientes: por un lado, el impacto gradual de la actividad, y, por el otro, el impacto súbito por causa accidental.

TABLA 3. Índices de cantidad para cada medio.

Medio receptor	Índice de cantidad	Variables
M1. Superficie del agua	$I_{Q1} = A_{Q1} + \log(Q1)$	Q1. Masa de sustancia en la superficie del agua
M2. Atmósfera	$I_{Q2} = A_{Q2} + \log(Q2)$	Q2. Masa de sustancia en la Atmósfera
M3. Masa de agua	$I_{Q3} = A_{Q3} + \log(Q3)$	Q3. Masa de sustancia en la Masa de agua
M4. Fondo del agua	$I_{Q4} = A_{Q4} + \log(Q4)$	Q4. Masa de sustancia en el Fondo del agua
M5. Litoral	$I_{Q5} = A_{Q5} + \log(Q5)$	Q5. Masa de sustancia en el litoral
M6. Suelo	$I_{Q6} = A_{Q6} + \log(Q6)$	Q6. Masa de sustancia en el suelo
M7. Aguas subterráneas	$I_{Q7} = A_{Q7} + \log(Q7)$	Q7. Masa de sustancia en el acuífero

Índices de peligrosidad:

Las Directivas europeas de clasificación de sustancias peligrosas consideran como variable representativa de la peligrosidad para el medio ambiente únicamente las concentraciones letales en agua para diversos seres vivos acuáticos.

No obstante ha habido accidentes en los que se ha producido un daño medioambiental grave al medio acuático por sustancias de ecotoxicidad teóricamente inferior a los límites previstos.

Por otro lado, por ejemplo, en accidentes con hidrocarburos, aunque normalmente clasificados como «Peligrosos para el medioambiente acuático» en razón de las concentraciones letales en agua, las características de muy baja solubilidad hacen que los efectos más perniciosos se manifiesten por la fracción no disuelta en superficie, en el fondo o en la línea litoral.

Es por ello que en cada uno de los casos se adoptará una variable diferente atendiendo a los mecanismos de afectación al medio, teniendo en cuenta los criterios de «disponibilidad» de forma que se utilicen valores reconocidos y accesibles para la mayoría de las sustancias.

En general, para la determinación del índice de peligrosidad se utiliza la expresión:

$$I_{pi} = A_{pi} + \log(x_{pi}) + fa = A_{pi} + \log(x_{pi}) + Kwoa/3$$

Donde

i denota cada uno de los medios
 x_{pi} se define para cada medio

fa representa un factor de bioacumulación, que adopta un valor de 1 en el límite para el que una sustancia sea considerada causante de efectos a largo plazo².

Kwoa Logaritmo del cociente de reparto [octanol]/ [agua]

A continuación se discute la adopción de las variables representativas de la peligrosidad en cada uno de los medios:

M1. Superficie del agua

La variable representativa, dados los posibles mecanismos de afección a los seres vivos (contacto e ingestión), sería la DL_{50} , dosis letal por ingestión para el 50 por ciento de los individuos, normalmente ratas, valor de mayor disponibilidad que el de administración por vía cutánea. Así:

$$x_{p1} = 1 / DL_{50}$$

Esta variable es matizada por el factor *fa*, definido anteriormente, y por el factor *fc*, el cual permite tener en cuenta el efecto de interposición a la entrada de luz en el ecosistema acuático; de esta manera aquellas sustancias que impiden el paso de la luz ob tienen un valor de 1, un valor de 0 aquellas que se consideran transparentes y no supone obstáculo a la penetración de la luz en el sistema acuático.

Índice de peligrosidad para M2. Atmósfera

Como variable representativa, dados los posibles mecanismos de afección a los seres vivos en este medio

(inhalación), sería la relación entre la proporción de presión de vapor de la sustancia en cuestión y la presión atmosférica y la CL_{50} en el aire representada como proporción de volúmenes, tomando como referencia la concentración letal para el 50 por ciento de los individuos, normalmente ratas, en un periodo de exposición equivalente de cuatro horas, que representaría cuantas veces es la concentración de la sustancia en la fuente superior a la concentración de referencia. Así:

$$x_{p2} = (Pvap/Patm)/CL_{50}aire$$

Índice de peligrosidad para M3. Masa de agua

La variable representativa para este medio se determina a partir de la solubilidad y la ecotoxicidad definida esta como la menor CL_{50} en agua para peces (en noventa y seis horas), para daphnia (en cuarenta y ocho horas) o para alga (en setenta y dos horas). Así:

$$x_{p3} = S/CL_{50}agua$$

Con esta variable obtenemos una referencia de cuántas veces la fase disuelta en la inmediatez del foco supera el valor de referencia marcado por la ecotoxicidad, pudiendo considerarse, así mismo, que la concentración que se alcance en este medio sea proporcional a la tasa de emisión de la sustancia en cuestión y a la solubilidad de la misma.

Índice de peligrosidad para M4. Fondo del agua

La variable representativa de la peligrosidad para el fondo del agua coincide con la expresión adoptada por la variable que describe la peligrosidad en la superficie del agua. Así:

$$x_{p4} = 1 / DL_{50}$$

Índice de peligrosidad para M5. Litoral

Como en el caso anterior, la expresión de la variable de la peligrosidad para el medio litoral coincide con la de la superficie del agua. Así:

$$x_{p5} = 1 / DL_{50}$$

Índice de peligrosidad para M6. Suelo

La expresión de esta variable coincide con la adoptada para la determinación de la masa de agua. Así:

$$x_{p6} = S/CL_{50}agua$$



El litoral es uno de los medios más vulnerables a los efectos de episodios de contaminación por la liberación de sustancias ajenas al medio.

Índice de peligrosidad para M7. Aguas subterráneas

Al igual que en el caso anterior, la expresión de la variable coincide con la definida para la determinación de la peligrosidad en la masa de agua. Así:

$$x_{p7} = S/CL_{50} \text{agua}$$

Índices de extensión

Los índices de extensión permiten valorar la afección en el espacio de las sustancias que irrumpen en los medios naturales receptores previamente definidos.

En general, para la determinación

del índice de extensión se utiliza la expresión:

$$I_{ei} = A_{ei} + \log(x_{ei})$$

Donde

i: Denota cada uno de los medios.

x_{ei} : Variable que se define para cada medio

TABLA 4. Índices de peligrosidad para cada medio.

Medio receptor	Índice de peligrosidad	X_{pi}	Factores
M1. Superficie del agua	$I_{p1} = A_{p1} + \log(x_{p1}) + fa + fc$	$1/DL_{50}$	<i>Fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ <i>fc</i> , donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua] factor color (<i>fc</i> =0 incoloro, <i>fc</i> =0.5 color claro, <i>fc</i> = 1 colores oscuros)
M2. Atmósfera	$I_{p2} = A_{p2} + \log(x_{p2}) + fa$	$(Pvap/Patm)/CL_{50} \text{aire}$	<i>fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua]
M3. Masa de agua	$I_{p3} = A_{p3} + \log(x_{p3}) + fa$	$S/CL_{50} \text{agua}$	<i>fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua]
M4. Fondo del agua	$I_{p4} = A_{p4} + \log(x_{p4}) + fa$	$1/DL_{50}$	<i>fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua]
M5. Litoral	$I_{p5} = A_{p5} + \log(x_{p5}) + fa$	$1/DL_{50}$	<i>fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua]
M6. Suelo	$I_{p6} = A_{p6} + \log(x_{p6}) + fa$	$S/CL_{50} \text{agua}$	<i>fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua]
M7. Aguas Subterráneas	$I_{p7} = A_{p7} + \log(x_{p7}) + fa$	$S/CL_{50} \text{agua}$	<i>fa</i> , factor de bioacumulación, $fa = Kwoa/3$ donde <i>Kwoa</i> : log [octanol/agua]

Las variables para cada medio se definen a partir de la superficie afectada representada a partir de la superficie afectada obtenida en función del volumen vertido y del espesor de la sustancia o bien a partir del volumen afectado, calculado este a partir de la cantidad de sustancia involucrada y de la CL_{50} de la misma.

TABLA 5. Variables que definen la extensión para cada medio.

Medio receptor	x_{ei}
M1. Superficie del agua	V_1/h
M2. Atmósfera	Q_{e2}/CL_{50}
M3. Masa de agua	Q_{e3}/CL_{50}
M4. Fondo del agua	V_4/h
M5. Litoral	V_5/h
M6. Suelo	V_6/h
M7. Aguas subterráneas	Q_{e7}/CL_{50}

La mayoría de las naciones industrializadas cuentan con reglamentaciones tendentes a limitar o controlar el riesgo «accidental» sobre el medio ambiente a través de sistemas de gestión que aseguren la fortaleza de todos los «eslabones de la cadena».

fin de llegar a obtener expresiones que permitan cuantificar la calidad del medio teniendo en cuenta que para su aplicabilidad futura las variables seleccionadas habrán de ser fácilmente accesibles.

CRITERIOS PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA MASA ENTRE MEDIOS

Es reconocida la complejidad de los sistemas naturales y de los fenómenos físicos que acompañan el transporte y el depósito de sustancias en el medio ambiente.

No obstante, de acuerdo con la metodología presentada, de la que se pretende extraer órdenes de magnitud de las consecuencias medioambientales, se esboza una metodología que asume ciertas simplificaciones para el cálculo de los mismos. (Fig. 2).

Por ello, a continuación se presentan los criterios generales adoptados con el fin de permitir la evaluación del reparo de masa entre los diferentes medios, con las incertidumbres y limitaciones asociadas que, en cualquier caso, son asumidas en la aplicación del método.

En general se han considerado los siguientes criterios:

Asignación inicial de masas a los diferentes medios

Para cada una de las hipótesis accidentales se analiza la masa total liberada de sustancia y en función de su ubicación se asignan las masas a cada uno de los medios: atmósfera, suelo, aguas superficiales y aguas subterráneas (caso de afectación directa de pozos).

Evaporación de derrames

La evaporación de derrames se estima a partir de expresiones que tienen en cuenta la extensión del mismo y las propiedades de la sustancia (peso molecular y presión de vapor), así como las condiciones meteorológicas medias del emplazamiento.

La estimación de la superficie de evaporación se evalúa a partir de las características de las sustancias y del suelo en que se produce el derrame, definiéndose el concepto de «espesor medio mínimo», que tiene en cuenta aspectos tales como la fluidez de la sustancia y la rugosidad, permeabilidad y orografía local en el punto de derrame.

La superficie del derrame estaría limitada, en su caso, por elementos fi-

TABLA 6. Índices de extensión para cada medio.

Medio receptor	Índice de extensión	x_{ei}
M1. Superficie del agua	$I_{e1} = A_{e1} + \log(x_{e1})$	V_1/h
M2. Atmósfera	$I_{e2} = A_{e2} + \log(x_{e2})$	Q_{e2}/CL_{50}
M3. Masa de agua	$I_{e3} = A_{e3} + \log(x_{e3})$	Q_{e3}/CL_{50}
M4. Fondo del agua	$I_{e4} = A_{e4} + \log(x_{e4})$	V_4/h
M5. Litoral	$I_{e5} = A_{e5} + \log(x_{e5})$	V_5/h
M6. Suelo	$I_{e6} = A_{e6} + \log(x_{e6})$	V_6/h
M7. Aguas subterráneas	$I_{e7} = A_{e7} + \log(x_{e7})$	Q_{e7}/CL_{50}

Índices de calidad

Para cada medio receptor se define un índice de calidad del medio específico. Bajo el concepto de «calidad» se reúnen varios aspectos como:

- La madurez del ecosistema en cuanto a la cantidad y calidad de las relaciones establecidas entre los distintos elementos que lo componen.

- La vulnerabilidad del sistema natural, concepto que tiene en cuenta la capacidad de carga del sistema y la de reacción frente a la acción de determinadas perturbaciones.

- Condicionantes de la calidad asociados al valor estético conferido a un determinado conjunto natural.

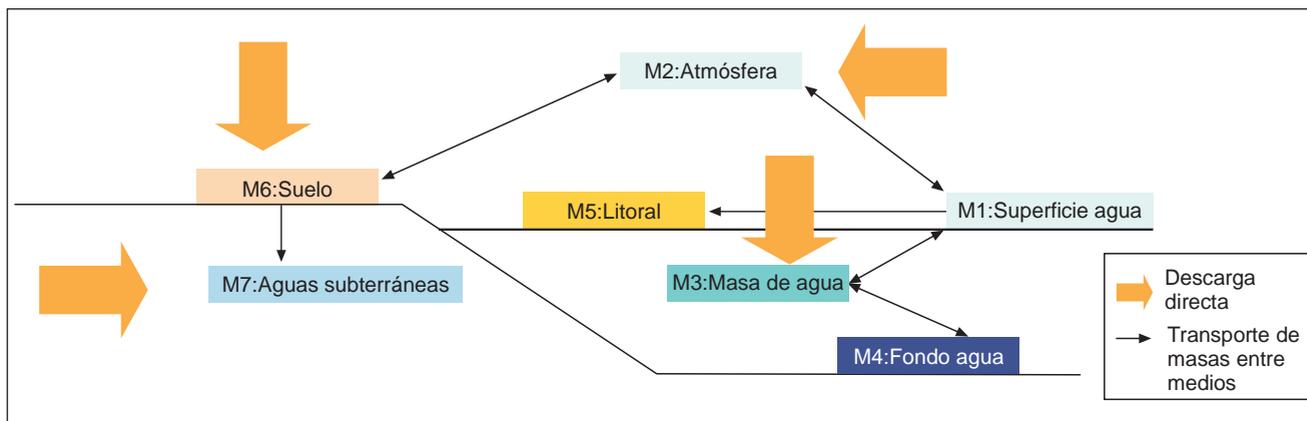
- El aprovechamiento de los recursos soportados por el sistema natural, especialmente en los casos de los recursos renovables.

- La representatividad en la que se valora la singularidad del sistema natural en comparación con el resto de los sistemas naturales conocidos.

La ausencia de referencias fácilmente accesibles para este tipo de indicadores de calidad impide que sea relativamente sencillo la obtención de parámetros que engloben a todos ellos de manera uniforme. En este punto, esta complejidad condiciona la elaboración de índices cuantitativos sólidos.

Teniendo en cuenta estos condicionantes, se trabaja actualmente con el

FIGURA 2. Distribución de la sustancia en el medio.



sicos que impidan la extensión de la sustancia (cubetos, etc.).

La cantidad evaporada de las sustancias se considera sobre un tiempo limitado, teniendo en cuenta la respuesta de la organización en caso de emergencia (cubrimiento con espuma, dilución, fragmentación del derrame en el agua, etc.)

Asimismo, la evaporación, en el caso de que resultaran espesores pequeños de sustancias muy volátiles, se vería limitada, de forma que se considera la permanencia de residuos por los siguientes factores:

El objeto de la Directiva Seveso es la prevención de accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas, así como la limitación de sus consecuencias, con la finalidad de proteger a las personas, los bienes y el medio ambiente.

- Retención de la sustancia por el suelo, evaluada a partir de la porosidad de éste y de las características de la sustancia.

- Disolución de la sustancia en la humedad del suelo, evaluada a partir de su solubilidad

- Presencia de fracciones más pesadas (presiones de vapor más bajas), que disminuyan de forma relevante la tasa de evaporación.

En casos singulares se analizarían las emisiones de vapores y gases de



Los accidentes con efectos ambientales graves requieren respuestas de larga duración para la recuperación del medio afectado.

disoluciones, así como las reacciones de la sustancia con el agua.

Deposición de sustancias en suspensión

Para el caso de polvos o nieblas, generados en la propia fuga o por condensación al enfriarse pueden establecerse modelos que evalúen la deposición de sustancia en el suelo o aguas superficiales.

Reparto de masas en el agua (lámina de agua-masa de agua-fondo)

El primer efecto considerado sería la disolución de la sustancia en el agua.

La complejidad de este fenómeno hace que no se disponga de modelos que den una respuesta satisfactoria para los objetivos de este tipo de estudios basados en la evaluación de la fracción disuelta sobre la base de la solubilidad.

La sustancia considerada no disuelta, dependiendo de su densidad, se considera que pasará a la superficie o al fondo si fuera sensiblemente más ligera o pesada que el agua.

Para densidades próximas a la del agua, y dado que para el caso de, por ejemplo, mezclas asfálticas, es un valor variable con la composición de la mezcla y con la temperatura; se puede considerar, salomónicamente, el criterio de asignar a partes iguales la masa a la superficie y al fondo, lo cual, si bien en este caso podría per-

La evaluación de las consecuencias sobre el medio ambiente debe tener en cuenta las fuentes de riesgo, los sistemas de control primario, los sistemas de transporte y los receptores vulnerables.

manecer en suspensión, las vías de afección a los seres vivos serían análogas a las de los materiales depositados en el fondo.

En cuanto a la fracción de sustancia capaz de afectar la línea litoral, se puede considerar una fracción de la masa que flota, determinada a partir de la ubicación del punto de vertido y las características hidrológicas, orográficas y meteorológicas del lugar.

Estimación de la cantidad y la extensión de la contaminación en la masa de agua subterránea

La fracción de masa que, derramada en el suelo, accede a los acuíferos, puede evaluarse sobre la base de parámetros tales como la solubilidad, densidad y composición de la sustancia, régimen de lluvias del lugar, permeabilidad y capacidad de retención (absorción y adsorción) del suelo y nivel freático medio, así como el tiempo esperado de respuesta para la recogida del producto derramado y del suelo contaminado.

APLICACIÓN PRÁCTICA

La metodología señalada ha sido aplicada para su calibración en un parque de almacenamiento de productos químicos orgánicos situado en una zona litoral de alto interés ecológico.

Los productos, como puede observarse en la Tabla 7, muestran una amplia gama de propiedades físicas (solubilidad, volatilidad, etc.) y toxicológicas.

En dicha instalación se reciben los productos desde un buque en un pantalán o desde un camión cisterna y son expedidos en camión cisterna.

Se analizaron diferentes hipótesis accidentales en las diferentes instalaciones (almacenamiento, bombeo, líneas de transporte, cargadero de cisternas y pantalán), reflejándose aquí los resultados para los accidentes en pantalán (derrame de unos 35 m³ de sustancia).

TABLA 7. Propiedades de sustancias consideradas.

Codigo	Sustancia	Datos físicos					Toxicidad aguda				Toxicidad ambiental		
		Densidad (kg/m ³)	Fracción de no volátiles	Solub. (g/l)	Pvap (kPa)	Pm (kg/kmol)	DL ₅₀ (mg/kg)	LC ₅₀ inh (mg/m ³)	Horas ref.	LC ₅₀ inh eq-4h (mg/m ³)	Ecotox. (mg/l)	Octanol/agua ua kwo	fa (=kwo/3)
1	Acetato de butilo	880	0,01	0,083	2	116,2	10.768	9.700	4	9.700	342	1,82	0,61
2	Acetato de etilo	895	0,01	50	10	88,1	5.620	5.873	8	11.747	212	0,73	0,24
3	Alcohol isopropílico	790	0,01	1.000	4.4	60,1	12.800	40.000	8	80.000	7060	0,28	0,09
4	Benzeno	900	0,01	1,8	10	78,1	930	32.542	7	56.949	29	2,13	0,71
5	Etanol	800	0,01	1.000	5.85	46,1	7.060	38.417	10	96.042	9509.92	-0,31	0,00
6	Metanol	800	0,01	1.000	12.7	32,5	5.628	85.467	4	85.467	10932.82	-0,77	0,00
7	Metiletilcetona	805	0,01	292	12.6	72,1	2.737	40.000	2	20.000	1627.1	0,29	0,10
8	Mononitrobenzeno	1.200	0,01	1,92	0.02	123,12	590	130	4	130	35	1,85	0,62
9	Nafta	700	0,2	0,03	40	115	14.000	5.000	4	5.000	9.5	4	1,33
10	Tolueno	900	0,01	0,5	2.9	92,15	636	1.535	24	9.210	12.5	2,73	0,91
11	Asfalto	1.000	0,99	0,01	0.01	200	5.000	2.000	4	2.000	10	4	1,33
12	Parafina	831	0,99	0,01	0.01	200	5.000	2.000	4	2.000	10	4	1,33

TABLA 8. Índices de peligrosidad de las sustancias consideradas.

Índices de peligrosidad en cada medio							
Código	Sustancia	M1. Superficie	M2. Atmósfera del agua	M3. Masa de agua	M4. Fondo del agua	M5. Litoral	M6. Suelo
1	Acetato de butilo	1,1	1,1	0,0	1,1	1,1	0,0
2	Acetato de etilo	1,0	1,2	2,6	1,0	1,0	2,6
3	Alcohol isopropílico	0,5	-0,3	2,2	0,5	0,5	2,2
4	Benzeno	2,2	1,0	2,5	2,2	2,2	2,5
5	Etanol	0,7	-0,4	2,0	0,7	0,7	2,0
6	Metanol	0,7	-0,2	2,0	0,7	0,7	2,0
7	Metiletilcetona	1,2	0,9	2,4	1,2	1,2	2,4
8	Mononitrobenzeno	2,3	1,0	2,4	2,3	2,3	2,4
9	Nafta	1,7	3,4	1,8	1,7	1,7	1,8
10	Tolueno	2,6	1,5	2,5	2,6	2,6	2,5
11	Asfalto	2,6	0,4	1,3	2,1	2,1	1,3
12	Parafina	2,3	0,4	1,3	2,1	2,1	1,3



El transporte de mercancías peligrosas, aunque no en el ámbito de la Directiva Seveso, es una de las actividades capaz de ocasionar daños al medio ambiente por causa accidental.

Resultado del estudio se muestra una ficha de cálculo para el derrame de una de las sustancias y un gráfico comparativo de la gravedad del impacto de cada sustancia en cada uno de los medios. (Tabla 9 y Fig. 3).

CONCLUSIONES

El concepto de riesgo medioambiental, muy amplio, ve en los accidentes en los que intervienen sustancias peli-

grosas su materialización con consecuencias y repercusión social que exceden de lo considerado «aceptable».

El análisis de este riesgo, de extrema complejidad en la diversidad de medios y mecanismos de dispersión e impacto a los ecosistemas, necesita de herramientas que permitan su sistematización en aras de la objetividad y la universalidad.

De la breve exposición realizada se concluye que se cuenta con una metodología que constituye un punto de

partida, con importantes dosis de rigor técnico, objetividad y viabilidad para la evaluación de las consecuencias sobre el medio natural, que viene a complementar disposiciones y normas existentes.

Los resultados, en combinación con herramientas de identificación de accidentes y evaluación de su frecuencia esperada, encontrarán una primera aplicación en la definición de medios técnicos y de gestión para la minimización y control del riesgo.

TABLA 9. Resultados detallados de un caso de derrame.

1	Nafta		9.1. Seccionamiento total del brazo de carga durante una descarga de buque						
Datos base del accidente	Código sustancia	Sustancia	Derrame en agua (kg)	Derrame en el suelo (kg)	Liberación a la atmósfera (kg)				
	9	Nafta	31 000	0	0				
Datos de la sustancia	Densidad del Líquido	Pvapor (Pa) (kg/m³)	Pmol (kg/kmol)	Solubilidad (kg/kg)	Fracción no volátil (kg/kg)				
	700	40000	115	0,00003	0,2				
Parámetros base de la sustancia en el medio	Espesor min. agua (mm)	Espesor min. tierra (mm)	Retención en el suelo (kg/kg)	Espesor min. en el Fondo (mm)	Espesor min. Litoral (mm)				
	1	1	0,05	1	1				
Extensión máxima de los medios	Superficie de corte del agua (m²) 2,0E+06	Superficie máxima tierra (m²) 0,0E+00	Masa de agua (m³) 2,0E+0,7	Superficie equivalente do Litoral (m²) 1,0E+0,5					
Distribución de la masa	Masa fluctuante inicial (kg)	Masa en el fondo inicial (kg)	Fracción disuelta (kg/kg)	Masa disuelta (kg)	Masa flotante (kg)				
	31 000	0	0,002996	92,86064	30,907				
Extensión inicial en los medios	Superficie de agua afectada (m²)	Superficie del suelo afectada (m²)	Superficie del litoral afectada (m²)	Radio inicial equivalente de agua (m)	Radio inicial equivalente de suelo (m)				
	44 153.06	0,00	19 745.85	118,55	0.00				
Evaporación	Tasa de evaporación en el agua (kg/s)	Tasa de evaporación en el suelo (kg/s)	Masa evaporada del suelo (kg)	Masa evaporada del agua (kg)	Masa flotante residual (kg)				
	223,61	0,00	0,00	24 725,71	6181,43				
CÁLCULO DE ÍNDICES DE CONSECUENCIAS AMBIENTALES									
Código	Medio	Masa (kg)	Extensión (m² o m³)	Índice Cantidad	Índice Peligro	Índice Extensión	Índice Calidad	Índice Final	Calificación
M1	Superficie agua	6.181	44.153	1,8	1,7	2,6	3	10,8	Leve
M2	Atmósfera	24.726	494.5142	1,4	3,4	2,7	2	12,9	Moderado
M3	Masa de agua	92,9	9775	1,0	1,8	3,0	3	10,6	Leve
M4	Fondo del agua	0	0	-4,0	1,7	-4,0	3	-1,6	Nulo
M5	Litoral	6.181	19.746	3,8	1,7	3,3	4	14,5	Moderado
M6	Suelo	0	0	-4,0	1,8	-4,0	2	-2,3	Nulo
9.1.	Más relevante	Litoral		Gravedad global			15	Grave	



La fauna es una de las primeras víctimas de las desastrosas consecuencias que producen los accidentes graves en el medio ambiente.

No obstante, se sigue trabajando en el desarrollo de la metodología sobre la base de un conjunto de requisitos, especialmente en los campos de la modelación de fenómenos de transporte, en la parametrización de la calidad del entorno natural y en la calibración relativa de los resultados en medios diferentes.

Es por ello que los autores están abiertos a cualquier sugerencia o co-

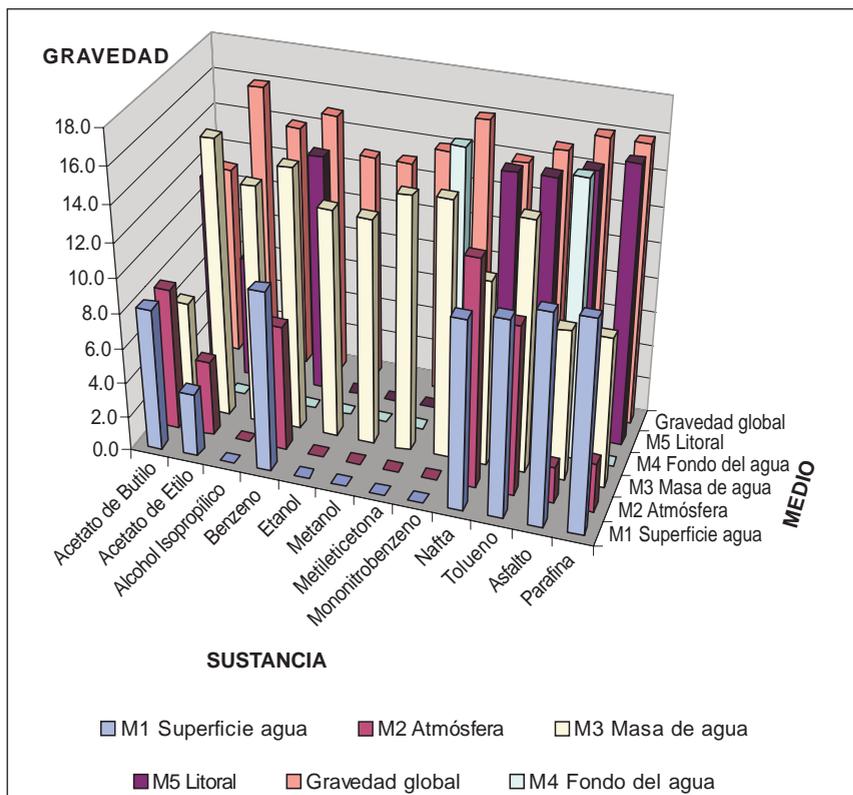
mentario que apoye la consecución de los objetivos señalados.

BIBLIOGRAFÍA

DIRECTIVA 96/82/CE del Consejo de 9 de diciembre de 1996, relativa al control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

La norma UNE 150 008 contempla en su alcance y metodología los elementos necesarios para la evaluación del daño al entorno natural por causa accidental a través de cuatro parámetros: cantidad de sustancia, peligrosidad, extensión de la contaminación y calidad del entorno natural.

FIGURA 3. Resultados de gravedad de impacto por sustancia y medio



REAL DECRETO 1254/1999, de 16 de julio, por el que se aprueban medidas de control de los riesgos inherentes a los accidentes graves en los que intervengan sustancias peligrosas.

DIRECTRIZ BÁSICA DE PROTECCIÓN CIVIL para el control y planificación ante el riesgo de accidentes graves en los que intervienen sustancias peligrosas, pendiente de publicación.

DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL DEL MINISTERIO DEL INTERIOR: *Metodología para el análisis de riesgos ambientales en el marco de la Directiva comunitaria 96/82/CE – SEVESO.*

NORMA UNE 150 008 EX *Análisis y evaluación del riesgo medioambiental*, elaborada por el comité técnico 150 Gestión Medioambiental de AENOR.

ITSEMAP S.T. MAPFRE: *Los riesgos medioambientales del siglo XXI*; 2002, Madrid.

COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTER: *Methods For the Calculation of Physical Effects*, The Yellow Book; 1997, The Netherlands.

COMMITTEE FOR THE PREVENTION OF DISASTER: *Guidelines For the Chemical Process Quantitative Risk Assessment.*, The Purple Book; 2000, The Netherlands.

MICHALIS D. CHRISTOU: *Substances Dangerous to the environment in the context of Council Directive 96/82/EC*; European Commission Joint research Centre.