

4. ESTRATEGIAS DE EVALUACIÓN DE RIESGOS – ENFOQUES PRÁCTICOS

En las secciones siguientes se presentan con más detalle los principios de valoración de los riesgos que se describen en el *capítulo 3*, en el contexto de una aplicación de enfoques prácticos. También se dan ejemplos prácticos para una mejor *ilustración*. Estos ejemplos se enfocan a demostrar los aspectos metodológicos y no están destinados a presentar los resultados de los análisis de riesgo de aplicación general, por lo tanto, no es posible sacar conclusiones para otros túneles o para otros, incluso similares, problemas sobre la base de estos resultados.

4.1. VALOR ESPERADO – APLICADO COMO CRITERIO ABSOLUTO DE RIESGO

Definición del enfoque

Los resultados de los análisis de riesgo (enfoque basado en el sistema) – expresado como valor de riesgo esperado (por ejemplo, número esperado de víctimas mortales por año para el túnel investigado) se comparan para obtener un valor objetivo predefinido. Si el riesgo inherente del túnel investigado es igual o menor a éste valor objetivo, es tolerable, si lo excede, entonces se deben tomar medidas adicionales.

Generalmente éste enfoque constituye un primer paso de un procedimiento más complejo de evaluación paso a paso. En cuanto a los criterios absolutos de riesgo, la magnitud del valor objetivo predefinido está estrictamente relacionada con la metodología aplicada para el análisis de riesgos (debido a la inexactitud de los resultados de los análisis de riesgos) y no puede ser utilizado para otras aplicaciones a falta de una verificación previa y profunda de aplicabilidad. El criterio de riesgo (valores objetivos) puede establecerse como criterio general (válido para un túnel) o de una manera normalizada (válida por kilómetro de túnel).

Es posible incluir también la aversión al riesgo en éste enfoque, dividiendo el valor esperado en varias clases de consecuencias y aplicando diferentes factores de consideración para esas diferentes clases de consecuencias (factores multiplicadores crecientes para la parte de riesgos de accidentes con consecuencias crecientes –sección 3.2). Así se pone más énfasis en los accidentes con consecuencias más altas; obviamente éste enfoque también necesita tomar en cuenta la definición de los valores objetivos correspondientes.

Otra opción es definir varios valores objetivos para riesgos parciales (en vez de sólo uno para el riesgo general) en este caso, cada riesgo parcial se compara con un objetivo específico (por ejemplo, riesgos de escenarios específicos). Los criterios de riesgo se cumplen si todos los valores de riesgo parciales tienen un valor igual o menor de su valor objetivo respectivo; éste enfoque permite una evaluación de riesgos más diferenciados incluyendo la opción de establecer valores objetivos más estrictos para determinados escenarios.

Aplicación práctica

Una aplicación típica de este enfoque es la evaluación del riesgo inherente al transporte de mercancías peligrosas en túneles de carretera. En este sentido, muchos países han desarrollado diferentes procedimientos de evaluación; una característica común de estos procedimientos es la utilización de un proceso por etapas, siendo el primer paso distinguir entre túneles críticos y no-críticos. Con éste propósito, los valores objetivos absolutos para el valor esperado se usan como 'criterio relevante'(criterio pertinente). Si los valores esperados calculados están por debajo de ese límite, se garantiza el respeto a otros criterios de aceptabilidad de riesgo: así

pues el riesgo es tolerable y no se requieren más mediciones ni estudios complementarios (*ilustración 15*). El objetivo de esta etapa es identificar desde el principio los túneles que no son críticos a fin de facilitar la toma de decisiones y para minimizar los gastos en investigaciones de seguridad (por ejemplo, para establecer normas de prohibiciones parciales sobre sustancias específicas en el contexto de la aplicación del ADR para túneles, [4]). Dicho enfoque es utilizado por ejemplo en Austria [18], Francia, Alemania [19] y Grecia; los límites normales para tales criterios de relevancia se dan en la tabla de la *ilustración 16* a continuación:

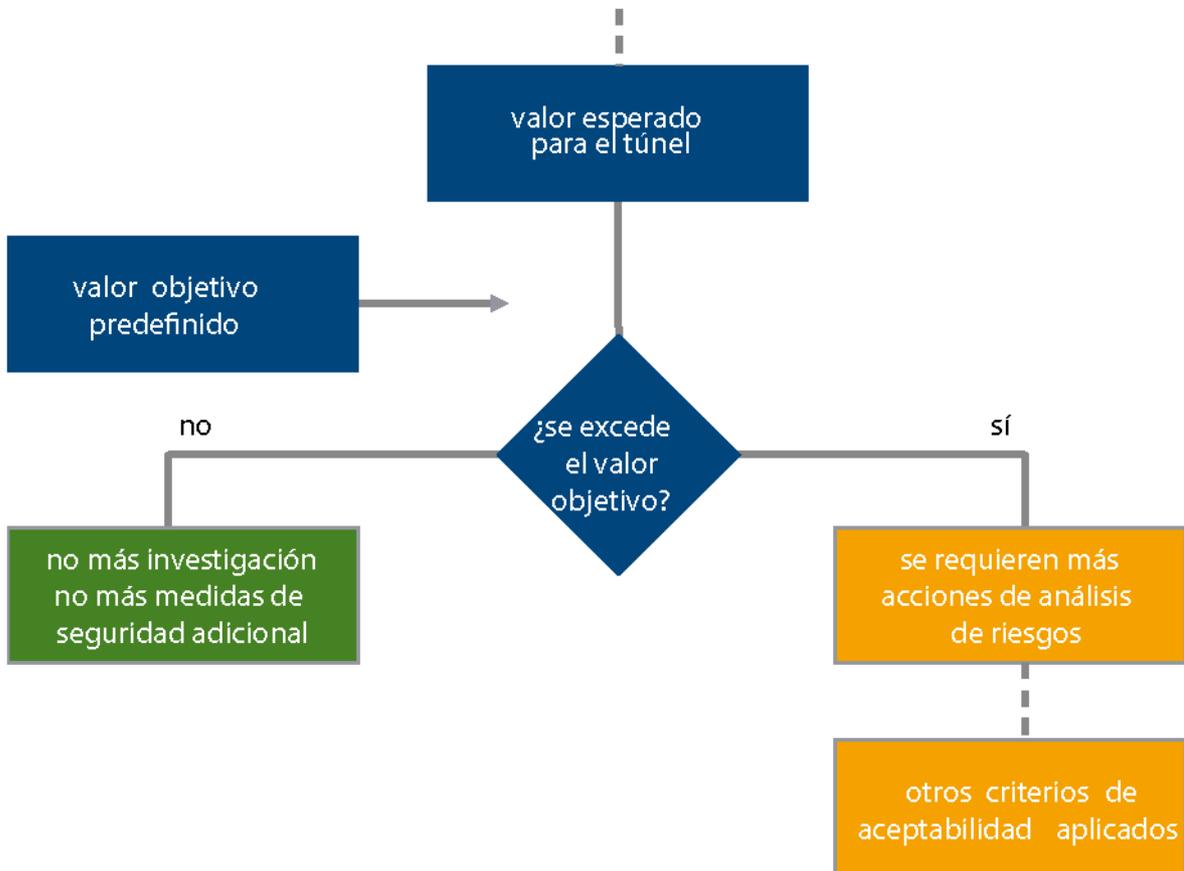


Ilustración 15 – Evaluación del riesgo de transporte de mercancías peligrosas para túneles

País	EM total	EM específico	Relacionado al método	Comentario
Austria	1 . 10 ⁻³ muertos/año	-	Modelo DG-QRAM	Válido por túnel
Francia	1 . 10 ⁻³ muertos/año	-	Modelo DG-QRAM	Válido por túnel
Alemania	6,2 . 10 ⁻³ muertos/año	Por escenario: Incendio : 5,0 . 10 ⁻³ m/km x año Incendio + explosión : 2,2 . 10 ⁻³ m/km x año Explosión : 1,0 . 10 ⁻⁶ m/km x año Toxicidad : 4,0 . 10 ⁻⁴ m/km x año	Modelo DG-QRAM	Válido por kilómetro de túnel
Grecia	1 . 10 ⁻³ muertos/año	-	Modelo DG-QRAM	Válido por túnel

Ilustración 16 – Valores objetivo habituales (em) para un criterio de relevancia para transporte de mercancías peligrosas a través de túneles (únicamente riesgo de transporte de mercancías peligrosas)

La **ilustración 16** muestra que el criterio de evaluación para Austria [18] y Grecia se basa en el enfoque francés en el que el valor umbral de la EM se fijó en 10-3 víctimas mortales por año mientras que el enfoque alemán está basado en varios elementos. En dicho enfoque, el valor umbral EM global está fijado en $6.2 * 10^{-3}$ víctimas mortales por año y por kilómetro [19]. Debido al hecho de que el EM global está fundamentalmente dominado por la influencia de incendios (que representan los escenarios más relevantes de mercancías peligrosas en términos de frecuencia); los objetivos específicos se han establecido para otros tipos de escenario (basados en la experiencia adquirida en el pasado). A pesar de que estos escenarios sólo tienen una pequeña influencia en los valores totales resultantes son susceptibles de causar consecuencias graves, incluso significativamente mayores que los escenarios de incendios.

Experiencia práctica y debate

Este enfoque es fácil de aplicar debido a que proporciona resultados inequívocos. Hay que señalar sin embargo que la evaluación del riesgo basada en un valor absoluto esperado es más bien un enfoque general y – sin precauciones específicas – no toma en cuenta aspectos específicos tales como:

- Información de las consecuencias de accidentes (los accidentes con muy bajas probabilidades/muy altas consecuencias sólo contribuyen en una pequeña parte al valor esperado).
- Información sobre diferentes efectos de daños (por ejemplo, mecánica, incendios, etc.).

Estas deficiencias pueden ser superadas al incluir la aversión al riesgo, definiendo valores objetivo independientes para grupos específicos de escenarios, representando la parte de los diferentes efectos del daño en el valor esperado y/o limitando estrictamente el uso de éste enfoque para aplicaciones definidas claramente (como se hace en el ejemplo de arriba).

Otro problema – como para cualquier criterio absoluto de aceptabilidad de riesgo – es la definición de los valores objetivo absolutos para el valor esperado; dicho valor debería basarse en un estudio exhaustivo (los puntos de referencia pueden ser riesgos aceptados en sistemas comparables, análisis de sensibilidad para varios ejemplos prácticos combinados con criterio de expertos). Además los resultados deben ser discutidos en un grupo incluyendo todas las partes interesadas. Este problema es complicado por el hecho de que un criterio absoluto está relacionado a una metodología específica: - por tanto es necesario definir claramente la metodología de análisis de riesgo a emplear y restringir la aplicación de un criterio específico para éste método en particular.

4.2. VALOR ESPERADO – APLICADO COMO CRITERIO RELATIVO DE RIESGO

Definición de enfoque

Los resultados de un análisis de riesgo (enfoque basado en el sistema) expresado como valores de riesgo esperados para dos o más alternativas se comparan entre sí a fin de seleccionar la que represente el nivel más bajo de riesgo. Este concepto puede ser utilizado para diferentes aplicaciones, tales como la evaluación de medidas de seguridad adicionales (según se explica en la sección 4.4) o la evaluación de riesgos mediante un “*túnel de referencia*”.

En el concepto de un “*túnel de referencia*” se define un túnel característico como aceptable en términos de riesgo por los interesados o por las normas, y es utilizado como referencia. El

"túnel de referencia" es normalmente definido como un túnel que garantiza que los objetivos de seguridad se cumplen de una forma equivalente, teniendo en cuenta todos los requisitos reglamentarios de seguridad (sin necesariamente considerar el funcionamiento de las medidas de seguridad).

El *"túnel de referencia"* es objeto de un análisis de riesgo y del cálculo de un valor esperado, que es empleado entonces como valor de referencia para compararlo el calculado para el túnel real. El método comparativo es independiente de la aplicación de criterios absolutos de aceptabilidad de riesgo y es compatible con el principio de aceptabilidad del mismo *"Globalmente al Menos Equivalente"* (GALME).

Los resultados de la evaluación de riesgos están estrictamente relacionados con el modelo de riesgo adoptado. Específicamente, la evaluación de riesgos depende de las incertidumbres concernientes a los parámetros de entrada y de los modelos de cuantificación de riesgos adoptados. La definición del valor de riesgo esperado y el concepto de *"túnel de referencia"* que caracteriza al método comparativo, ayuda a reducir el impacto de la incertidumbre en los resultados de la evaluación de riesgos, siempre y cuando se utilice el mismo modelo de cálculo para todos los objetos de comparación.

El criterio de riesgo relativo no requiere decisiones sobre los valores de referencia absolutos; el riesgo aceptado está implícito en la definición del túnel de referencia.

Al igual que en el caso de la aplicación de criterios absolutos, este enfoque puede también considerar el tamaño de la aversión al riesgo al subdividir el valor esperado en varias clases de consecuencias y al aplicar diferentes factores de ponderación sobre la base de estas diferentes clases de consecuencias (aumento de multiplicadores en función del crecimiento de las consecuencias –sección 3.2). De este modo se pone más énfasis en los accidentes de consecuencias más altas. Otra opción es definir varios valores de referencia, cada uno relativo a un riesgo parcial (en lugar de sólo uno para todo el riesgo), cada valor de referencia es entonces asignado a un riesgo parcial específico (por ejemplo, riesgos de escenarios específicos). Los criterios de riesgo son únicamente satisfechos si todos los valores parciales se encuentran por debajo del de referencia respectivo. Este enfoque permite una evaluación de riesgos más específica, incluyendo la posibilidad de encontrar medidas alternativas específicas para escenarios críticos.

Aplicación práctica

Una posible aplicación de este enfoque es la evaluación de medidas alternativas a las de seguridad obligatorias. Algunos países de Europa desarrollaron diferentes procedimientos de evaluación, siendo una característica común a todos ellos la definición de un túnel de referencia que cumpla con la Directiva de la Unión Europea 2004/54/CE que define los requisitos mínimos de seguridad para los túneles de la red transeuropea de carreteras en términos de prescripciones de seguridad [2].

La principal diferencia entre los enfoques es el tipo de peligros considerados para el cálculo del riesgo: accidentes de tráfico, incendios, accidentes que involucran mercancías peligrosas. La consideración de peligros diferentes caracterizados por distintos valores de riesgo puede llevar a conservar diversas medidas de seguridad en el proceso de su evaluación.

La aplicación de la comparación de riesgo relativo no asegura el mantenimiento de los valores absolutos. La demostración o hipótesis se deben hacer para que el nivel de riesgo del túnel de referencia sea aceptable.

Este tipo de enfoque se aplica por ejemplo en Austria e Italia donde las principales características del análisis y del criterio adoptado en dichos países se muestran en la tabla de abajo.

	PELIGROS	TÚNEL DE REFERENCIA
Italia [20]	<ul style="list-style-type: none"> • Incendios • Accidentes de carretera con incendios • Fugas tóxicas • Derrame de líquidos 	Un túnel virtual cumple totalmente con los requerimientos de seguridad mínimos preestablecidos en la Normativa de la Unión Europea con un rendimiento predefinido para los sistemas de seguridad. No se dan indicaciones acerca de las características de longitud y tráfico.
Austria [21]	<ul style="list-style-type: none"> • Accidentes de carretera seguidos de efectos mecánicos • Incendio de vehículos • Accidentes de carretera que involucran mercancías peligrosas (enfoque limitado únicamente) 	Un túnel de las mismas características de longitud, tipo y tráfico completando totalmente los mínimos requerimientos de seguridad de la Normativa de la Unión Europea.

El método austríaco está basado en la filosofía de que un túnel es suficientemente seguro si su riesgo es menor al riesgo de un túnel de referencia que cumple todos los requerimientos de la Normativa de la UE, incluyendo parámetros de referencia definidos en el anexo 1 (tales como una pendiente longitudinal del 3% o un porcentaje de camiones del 15%). Éste enfoque de evaluación de riesgo por comparación relativa al nivel del valor esperado está complementado por una evaluación de la magnitud absoluta del riesgo resultante del análisis de riesgo, el cual es aplicado para una clasificación de los túneles en categorías de peligro de 1 a 4 [22]. La categoría de peligro de un túnel es utilizada para la definición de los requisitos para el equipamiento del túnel de acuerdo a las directivas austríacas de construcción de túneles.

Dado que Italia tiene muchos túneles con características especiales, el Método Italiano de Análisis de Riesgo (IRAM, por sus singlres en inglés) precisa el desarrollo de una evaluación de riesgo absoluto con curvas F-N para todos los túneles antes de aplicar el criterio comparativo a fin de demostrar que la curva F-N se encuentra por debajo del límite de tolerancia [23]. De hecho, el criterio comparativo es actualmente adoptado como un método simplificado para satisfacer el criterio de reducción de riesgos ALARP. La comparación se realiza entre los Valores de Daño Esperados derivados de la definición integral de las curvas F-N calculadas por una metodología bien definida.

El límite principal de éste método de evaluación de riesgo es la definición del túnel de referencia el cual se basa, hasta cierto punto, en el criterio de expertos en particular cuando representa un túnel conforme a la regulación normativa y la regulación fundamental no define todos los parámetros relacionados al riesgo. La definición de un túnel de referencia para comparar las medidas estructurales con sistemas de seguridad alternativos puede considerar la fiabilidad y la eficiencia de los sistemas que pueden no encontrarse en las regulaciones normativas. La definición de un marco de referencia para sistemas de seguridad puede derivarse de buenas prácticas desde el diseño, o bien establecerse en el ideal: los criterios de expertos, las simplificaciones y las incertidumbres pueden afectar los resultados de la evaluación de riesgos.

Experiencia práctica y debate

El enfoque es fácil de aplicar pero puede proporcionar resultados ambiguos que derivan de la adopción de una única cifra para representar el riesgo y de la definición de un túnel de referencia. Hay que reconocer que la evaluación de riesgo basada en un valor esperado relativo es más bien un enfoque general y – sin las precauciones específicas – no toma en cuenta determinados aspectos como:

- Información de las consecuencias de accidentes (los accidentes con muy baja probabilidad/ muy altas consecuencias sólo contribuyen en menor medida al valor esperado).
- Información de diferentes efectos del daño (por ejemplo, mecánico, incendio, etc.).
- Información de las incertidumbres asociadas al riesgo.

Como en el caso de aplicación de los criterios absolutos, algunas de estas deficiencias pueden superarse al incluir la aversión al riesgo, con el establecimiento de diferentes valores de referencia independientes para grupos de escenarios específicos, especificando la parte de diferentes tipos daños esperados y/o restringiendo estrictamente el uso de éste enfoque con aplicaciones claramente definidas.

Otro problema – como para cualquier criterio relativo de aceptación de riesgos – es la definición de las características del túnel de referencia y los peligros a considerar. Dicho túnel debería basarse en un estudio exhaustivo (análisis de sensibilidad para varios ejemplos prácticos combinados con criterio de expertos) y los resultados deberían ser debatidos en un grupo incluyendo todas las partes interesadas.

La elección de parámetros estadísticos de orden superior (desviación típica, asimetría y curtosis de una distribución de datos) puede aumentar el nivel de información de los valores de riesgos asociados al túnel, es probable que contribuyan a la definición de los niveles de tolerancia, siempre que estos parámetros puedan ser derivados de una base de datos sólida.

Si se utiliza el mismo modelo de riesgo tanto para el túnel investigado como para el de referencia, se reduce la influencia de errores/falta de nitidez (mismos errores sistemáticos, más o menos misma falta de nitidez en los datos de entrada).

La mera comparación de la configuración de dos túneles sin tener en cuenta la efectividad de los sistemas ni los niveles de incertidumbres, pueden producir resultados ambiguos, en particular cuando hay pequeñas diferencias entre el valor del túnel de referencia y el valor del túnel investigado dado que la evaluación se realiza sobre la base de la confrontación de dos cifras que son incapaces de describir de forma completa el riesgo asociado con un sistema complejo.

4.3. CURVA F-N – APLICADA COMO CRITERIO ABSOLUTO DE RIESGO

Definición del enfoque

Los resultados de un análisis de riesgo (basado en el sistema) representado como una curva F-N se comparan con un criterio absoluto predefinido en forma de una curva de aceptabilidad en el diagrama F-N. Por lo tanto, la metodología de análisis de riesgos tiene que proporcionar evaluaciones cuantitativas para diferentes escenarios en términos de frecuencias y consecuencias. Para ciertas aproximaciones metodológicas se analizan varios indicadores de riesgo. Por tanto, es necesario definir las curvas de aceptabilidad en el diagrama F-N o el uso de unidades estandarizadas de consecuencias para los diferentes indicadores de riesgos.

Aplicación práctica

El uso de curvas de aceptabilidad en los diagramas de F / N es la base para la evaluación de los riesgos en los túneles de carretera en diversos países, como se muestra en la *ilustración 17* a la *ilustración 22*. Cabe señalar que parte de los criterios de referencia mostrados son aplicables para el riesgo del tráfico general mientras que algunos criterios son sólo válidos para el riesgo del transporte de mercancías peligrosas a través de túneles de carretera. Los criterios aplicados para el transporte de mercancías pueden ser más restrictivos que los que se aplican tráfico general. Además, hay que destacar que una serie de líneas de referencia se correlacionan estrictamente a un método o un modelo de riesgo particular. A continuación se da un pequeño resumen de los criterios de evaluación para cada aplicación.

Holanda

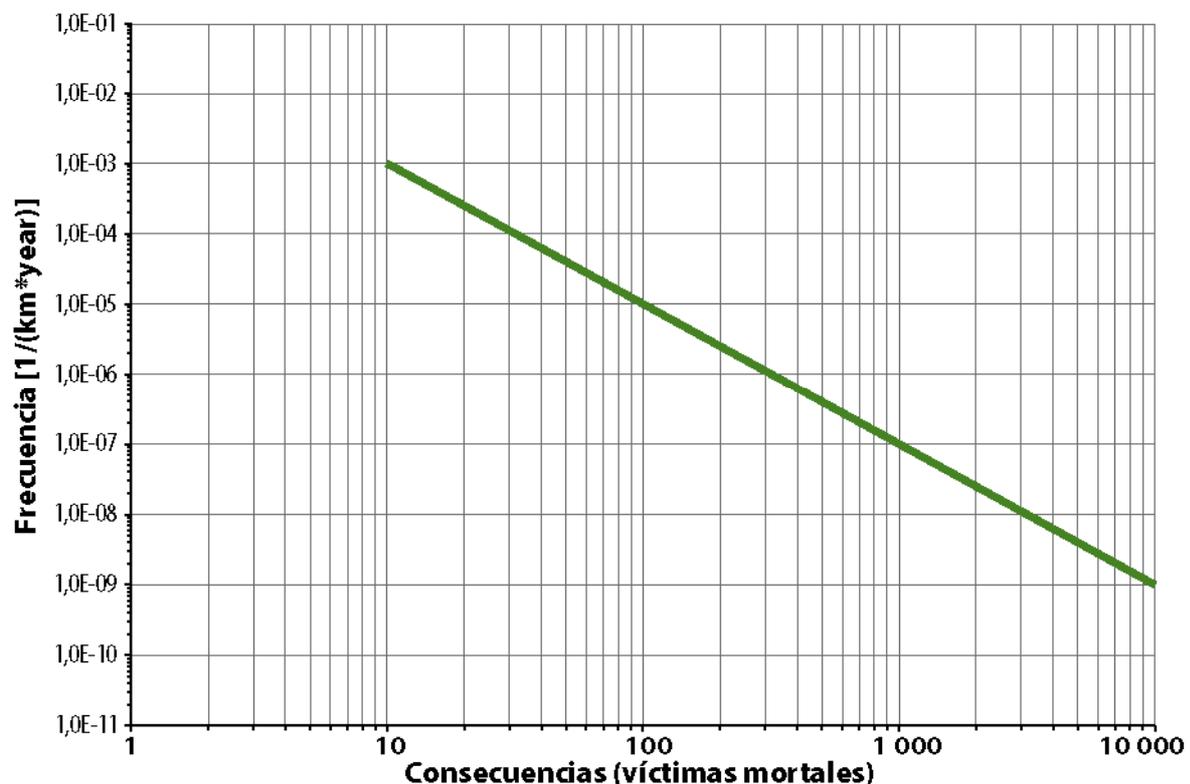


Ilustración 17 – Criterio Holandés de riesgos para túneles de carretera

En los Países Bajos la norma es que, en principio, no hay restricciones para el transporte de mercancías peligrosas en las principales redes viales con excepción de los túneles subacuáticos. La mayoría de estos túneles tienen categoría C y algunos de ellos D (de acuerdo a las regulaciones ADR de túneles [4]). El criterio de referencia es:

$$F = 0,1 \cdot N^{-2} \text{ por kilómetro por año, } N > 10 \text{ muertes}$$

Este criterio no es un valor restrictivo, sino un valor objetivo. La desviación es posible si se proveen los argumentos necesarios para realizarla (sin está adecuadamente justificada). Los cálculos de riesgos se hacen para el uso esperado en el futuro (un año horizonte dado) (generalmente un periodo de aproximadamente 15 años).

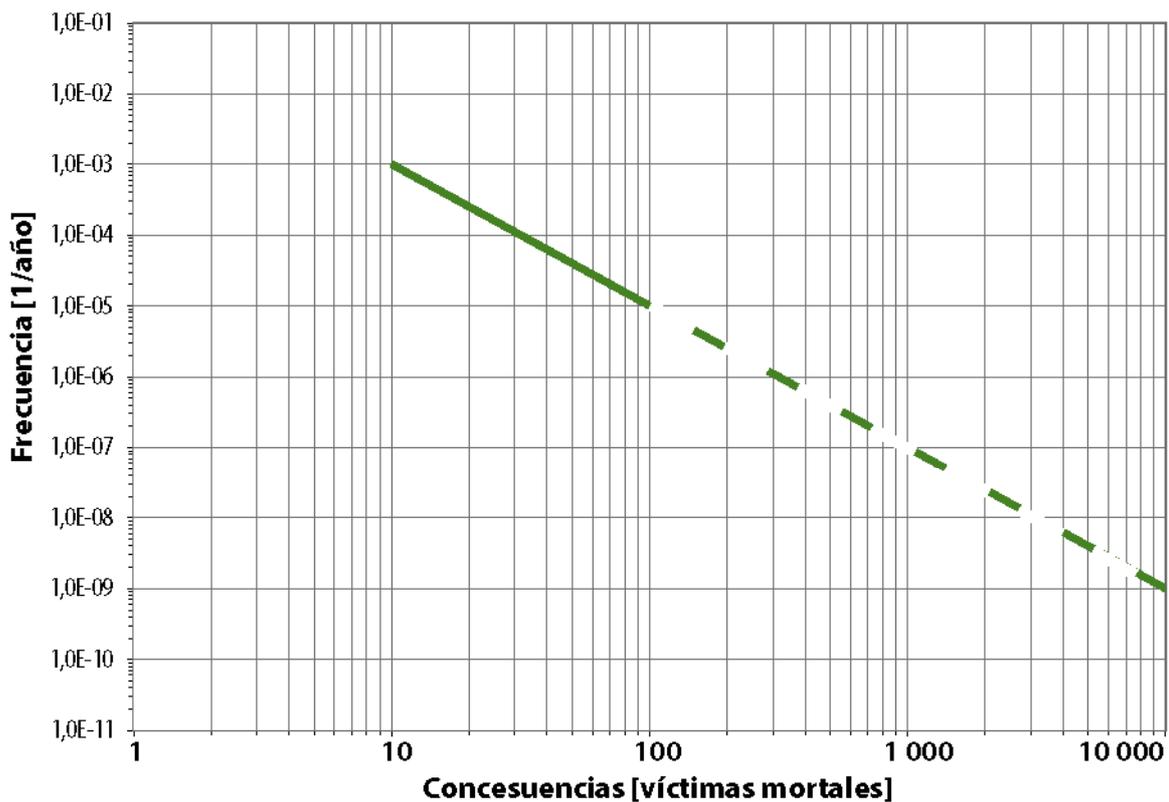
Austria

Ilustración 18 – Criterio austríaco de riesgos para transporte de mercancías peligrosas a través de túneles de carretera [18]

En Austria, la directiva RVS 09.03.12 [18] “Transporte de mercancías peligrosas a través de túneles de carretera” define la siguiente línea de referencia como criterio absoluto de riesgo en el diagrama F-N:

$$F = 0,1 \cdot N^{-2} \text{ para } N > 10 \text{ muertos}$$

Ésta línea de referencia es únicamente aplicada en la segunda etapa de un procedimiento de evaluación de varias etapas para el riesgo de transporte de mercancías peligrosas por túneles de carretera y está fuertemente ligado al modelo de riesgo DG-ACRM [3]. La línea de referencia es válida para 1 km. de longitud de túnel de carretera; está adaptado a túneles de diferentes longitudes de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$F = 0,1 \cdot N^{-2} \cdot L^{0,5} \text{ para } N > 10 \text{ muertos}$$

Para la definición de ésta línea de referencia se tomaron en cuenta los siguientes aspectos:

- Nivel de riesgo de un sistema de referencia.
- Características del modelo de riesgo DG-ACRM [3].
- Características de un túnel austríaco de carretera común.
- Resultados de los cálculos de pruebas para modelos habituales de túnel.

Italia

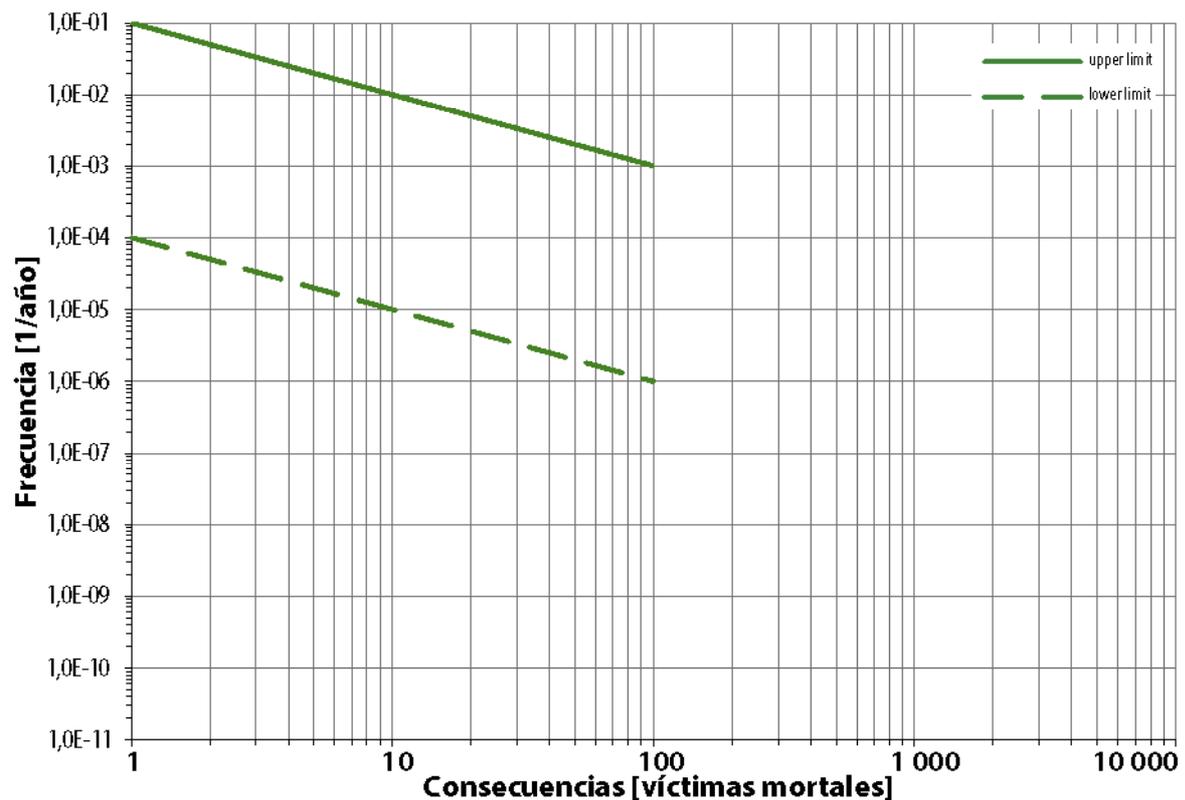


Ilustración 19 - Criterio italiano de riesgo para túneles de carretera [20]

Para la evaluación del riesgo resultante para un túnel de acuerdo al Método Italiano de Análisis de Riesgo (IRAM) los siguientes criterios de aceptabilidad están definidos como criterio absoluto de riesgo en un diagrama F-N [20]:

- Para el límite superior según la siguiente función:
 $F = 0.1 \cdot N^{-1}$ para $N \geq 1$ muertos si la curva F-N resultante se encuentra por encima de éste límite superior, el riesgo será evaluado como inaceptable.
- Para la definición de riesgo tolerable se usa un límite más bajo:
 $F = 10^{-3} \cdot N^{-1}$ para $N \geq 1$ muertos.

El área entre el límite superior y el inferior define el área de aplicación del principio "ALARP" (Tan Bajo Como Sea Razonablemente Factible). La línea de aceptabilidad es válida para el túnel o – en caso de un túnel de dos tubos independientes – para un tubo del túnel.

Republica Checa

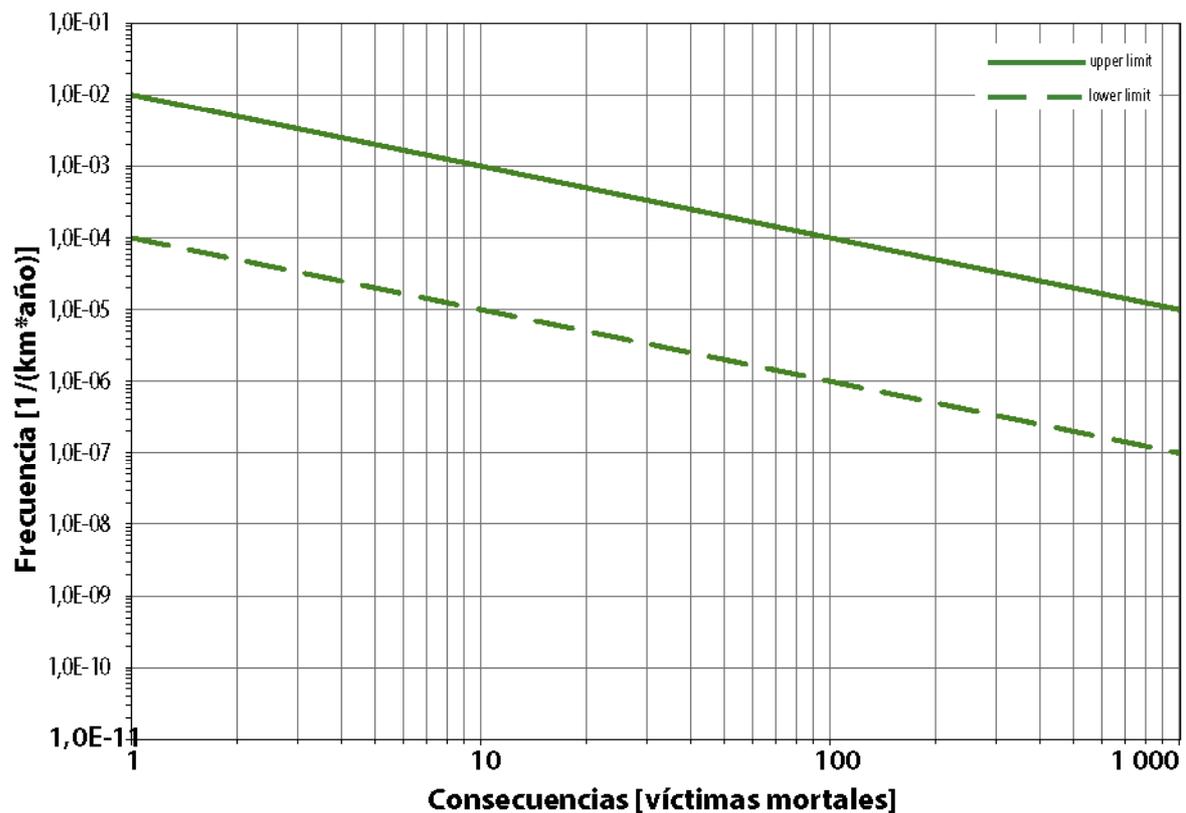


Ilustración 20 – Criterio de la República Checa para los túneles de carretera

Los criterios de referencia empleados en la República Checa no están basados en ningún requerimiento legal. El criterio constituye una recomendación general para los túneles checos, formulado en base al conocimiento y la experiencia en cooperación internacional [24]. Los criterios de referencia son recomendables para un túnel de 1 km. de longitud (por 1 año) y son aplicables respecto del riesgo del tráfico total del túnel, sin ninguna especificación adicional a la carga a ser transportada. La recomendación define las siguientes líneas de referencia como criterio de riesgo en el diagrama F-N:

- Límite superior: $F = 0,01 \cdot N^{-1}$ para $1 \leq N \leq 1000$ muertos
- Límite inferior: $F = 10^{-4} \cdot N^{-1}$ para $1 \leq N \leq 1000$ muertos

Donde F es la probabilidad acumulativa de ocurrencia de incidentes siendo el número de víctimas mortales mayor que o igual a la cifra N. De manera similar a otros sistemas, el criterio checo también emplea el principio ALARP.

Suiza

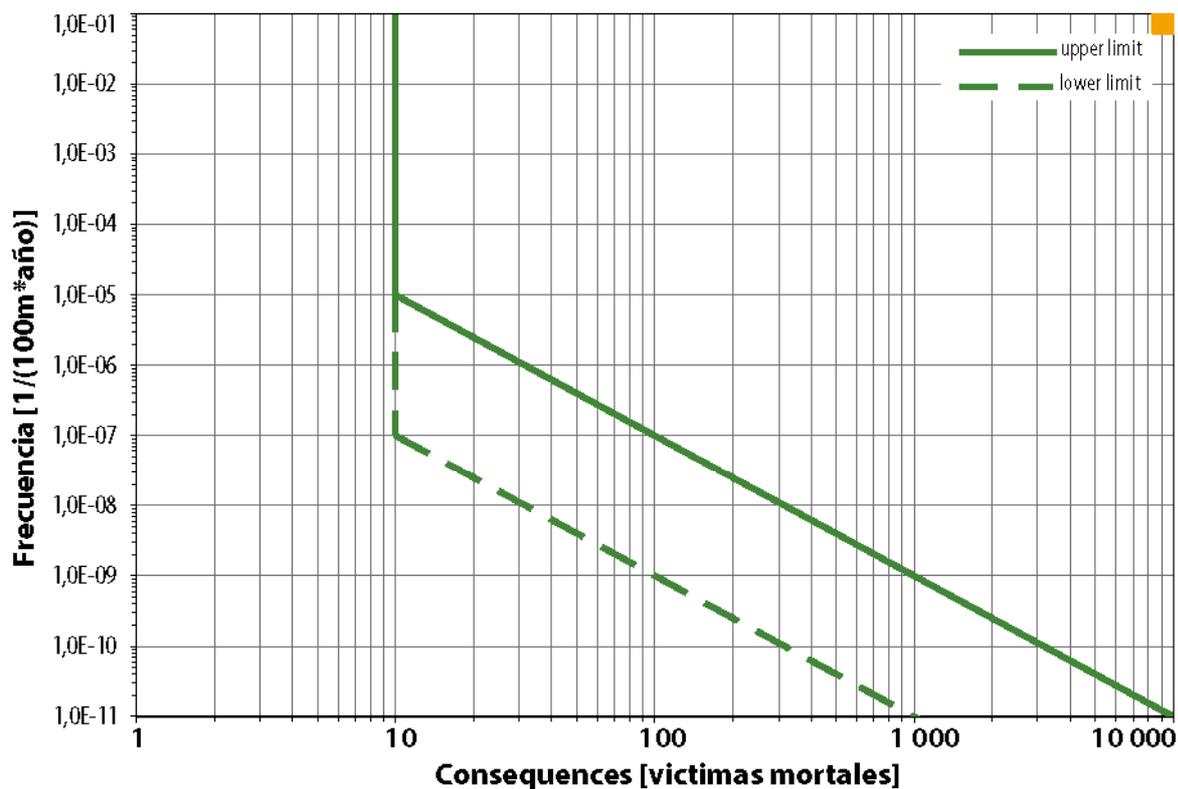


Ilustración 21 - Criterio suizo de riesgo para el transporte de mercancías peligrosas (incluyendo túneles de carretera) [25]

En Suiza, la “Ordenanza de Protección contra Riesgos de Accidentes Graves” requiere entre otras cosas la valoración y evaluación de riesgos (y el correspondiente proceso global) consecuencia del transporte de mercancías peligrosas por carretera, incluyendo los túneles. El propósito de esta ordenanza, que entró en vigor en 1991, es proteger a la sociedad y al medioambiente de eventuales daños resultantes de accidentes graves causados por el almacenamiento, carga/descarga y transporte de mercancías peligrosas e informar a la sociedad de la existencia de dichos riesgos. El procedimiento para controlar y evaluar el peligro potencial y los riesgos implica dos etapas. En la primera el propietario del túnel presenta un informe de síntesis que contenga una valoración de los riesgos. En base a esta valoración la autoridad responsable decide si en una segunda etapa se desarrolla o no una valoración cuantitativa del riesgo. Si esta segunda etapa fuera necesaria el riesgo de los incidentes en túneles y sus correspondientes efectos sería expresado cuantitativamente en términos de frecuencia de los escenarios de accidentes, representados como curvas F-N, normalizado a 100 m. La autoridad responsable evalúa el riesgo de la siguiente forma:

- Si la curva de frecuencia acumulativa entra, incluso parcialmente, en el campo de intolerable, se le pide al propietario del túnel que reduzca el riesgo, de lo contrario las autoridades están facultadas para tomar medidas, como la imposición de restricciones a la explotación.
- Si la curva F-N acumulativa se encuentra entre los límites superior e inferior (ALARP), la autoridad responsable evaluará los intereses del propietario del túnel en relación con las necesidades de la sociedad y del medioambiente para la protección de accidentes. Dependiendo del resultado de estas consideraciones, se debe reducir el riesgo al nivel definido por la autoridad.
- Si la curva F-N está en todos sus puntos en el campo tolerable, el procedimiento de valoración del riesgo se considera completo. Sin embargo, el propietario está obligado a tomar todas las medidas necesarias para reducir el riesgo.

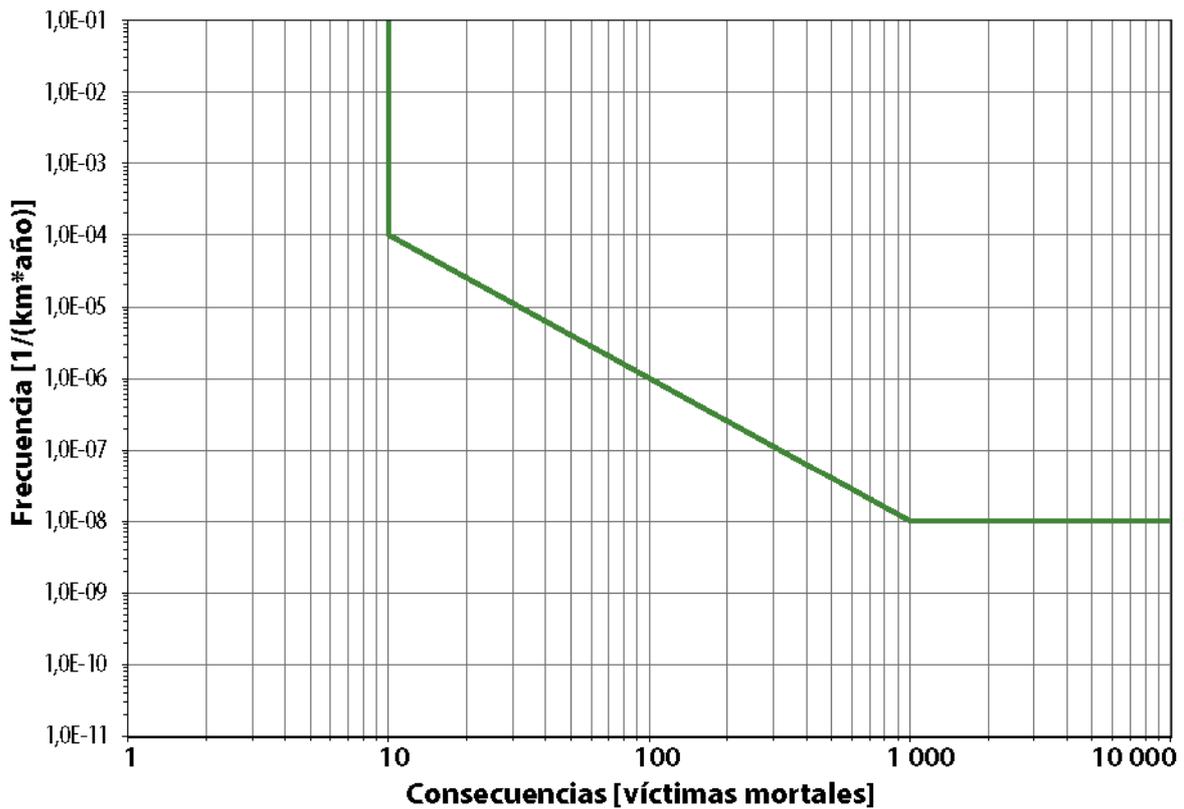
Alemania

Ilustración 22 – Criterio alemán de riesgo para el transporte de mercancías peligrosas a través de túneles de carretera [19]

Durante la implementación de las regulaciones ADR de túneles [4] se desarrolló dentro de un proyecto de investigación una metodología específica para el análisis y evaluación del riesgo asociado al transporte de mercancías peligrosas. El procedimiento desarrollado para una clasificación basada en el riesgo de los túneles de carretera en categorías de acuerdo a la ADR consiste en dos etapas. En una evaluación estimativa (etapa 1, ver también el criterio de evaluación en la *ilustración 16*) un túnel será supervisado/controlado en dos etapas para determinar si se pueden permitir todos los transportes de mercancías peligrosas o no. Cuando los riesgos asociados con las mercancías peligrosas se evalúen como muy elevados por medio de los modelos simplificados de la etapa 1, se debe examinar el túnel en profundidad. El riesgo resultante tiene que ser representado como una curva F-N (normalizada para 1 km) para cada uno de los escenarios analizados por una parte y el riesgo total por otra parte. Si el riesgo calculado se encuentra por debajo de la curva comparativa basada en valores empíricos, se pueden permitir todos los transportes de mercancías peligrosas en el túnel. Si la curva de riesgo está por encima de la curva comparativa, el túnel será clasificado en una de las categorías prescritas por la reglamentación, es decir que será bloqueado el transporte de mercancías con el correspondiente código de restricción del túnel y se deben tener cuenta medidas de infraestructura, técnicas, y organizativas para reducir el riesgo.

Experiencia práctica y debate

La evaluación basada en las curvas de aceptabilidad en un diagrama F-N aplicado como criterio absoluto de riesgo proporciona resultados ambiguos. Además proporciona información más detallada sobre el perfil de riesgo y la relevancia de escenarios específicos. Cabe señalar que por motivos prácticos, las incertidumbres en la evaluación del riesgo no son normalmente tomadas en cuenta en términos de curvas de aceptabilidad. Por lo tanto, es esencial para hacer frente a la cuestión de la sensibilidad de los riesgos calculados especialmente si la curva de frecuencia acumulada está cerca del rango de aceptabilidad

Respecto a las deficiencias de éste enfoque, se debe tener en cuenta que para una evaluación basada en el criterios absolutos aplicados a las curvas F-N, la definición de los límites/curvas de aceptabilidad puede ser un proceso a largo plazo en el cual todos los interesados deben estar involucrados. Por otra parte, como lo demuestra la experiencia, la evaluación de riesgos en las que la curva F-N está en el área ALARP es a veces poco claro y la interpretación de la importancia de las medidas adicionales de seguridad a menudo no son tratadas de una manera coherente.

4.4. CURVA FN – APLICADA COMO CRITERIO RELATIVO DE RIESGO

Definición del enfoque

Los resultados del análisis de riesgos (basado en el sistema) representado como curvas F-N de dos o más alternativas se comparan entre sí a fin de seleccionar una alternativa que represente un nivel de riesgo más bajo. Una alternativa se considera mejor si la curva F-N representando a dicha alternativa está, por un lado, (continuamente) por debajo en todos los puntos de la curva que representa a la otra alternativa y por otra parte, las diferencias entre las curvas F-N comparadas excede las incertidumbres. No obstante, en un enfoque relativo, el impacto de la incertidumbre sobre los resultados de la evaluación de riesgos puede ser limitada, especialmente si las curvas F-N comparadas se calcularon con el mismo modelo de riesgo utilizando más o menos los mismos datos de entrada. Ésta estrategia de evaluación de riesgos puede combinarse con el concepto de un túnel de referencia, según se describe en la [sección 4.2](#).

Éste enfoque comúnmente constituye un paso dentro de un procedimiento de evaluación por etapas más complejo:

- Primera etapa: Análisis de riesgo inicial para determinar el riesgo inherente a una opción de base dada, que puede requerir estudios adicionales (por ejemplo, a fin de reducir riesgo con medidas adicionales de seguridad).
- Segunda etapa: El cálculo y la comparación de las curvas F-N para diferentes posibles opciones a estudiar (opción de base y las posibles alternativas)
- Tercera etapa: Elección de una opción que presente un nivel de riesgo que sea considerado más bajo que las otras opciones posibles. En esta fase del estudio, también se pueden considerar otros criterios. Particularmente en situaciones donde no se puede tomar ninguna decisión clara con éste enfoque comparativo (mismo nivel de riesgo para todas las opciones posibles), puede ser necesario definir nuevas opciones para comparar, o tomar otro criterio en cuenta (por ejemplo, teniendo en cuenta los costos en un enfoque costo/eficiencia, el valor esperado adoptado como segundo criterio de riesgo).

Aplicación práctica

Las aplicaciones características de éste enfoque comparativo son:

- Valoración de efectos (de riesgo) de medidas adicionales de seguridad que pueden ser aplicadas para reducir el riesgo de una cierta opción básica dada.
- Evaluación de riesgo por comparación de la curva F-N de un determinado túnel con la curva F-N de un túnel de referencia.
- Elección de una categoría de túnel de acuerdo a la normativa ADR [4], por ejemplo la comparación de distintas opciones respecto a la autorización de transporte de mercancías peligrosas en un cierto túnel de acuerdo a las categorías ADR: posibilidad de escoltar los camiones que transportan mercancías peligrosas en el túnel, posibilidad de prohibir el paso a dichos camiones durante algunos periodos de tiempo, etc.

Se exponen dos ejemplos (para la primera y la tercera aplicación):

Primer ejemplo

Un túnel de 600 mt. de longitud con tráfico unidireccional, con una salida de emergencia en la mitad y sin medidas adicionales de seguridad de ventilación mecánica; tiene que ser evaluado a fin de seleccionar la más efectiva en términos de reducción de riesgos. Una medida de mitigación de riesgos investigada es la implementación del sistema de ventilación longitudinal.

El nivel de riesgo del túnel en su estado original y después de la implementación de esta medida de seguridad adicional, se describen en forma curvas F-N según se muestran en la *ilustración 23*.

El riesgo esperado (riesgo de incendio solamente) se utiliza como un criterio de decisión adicional.

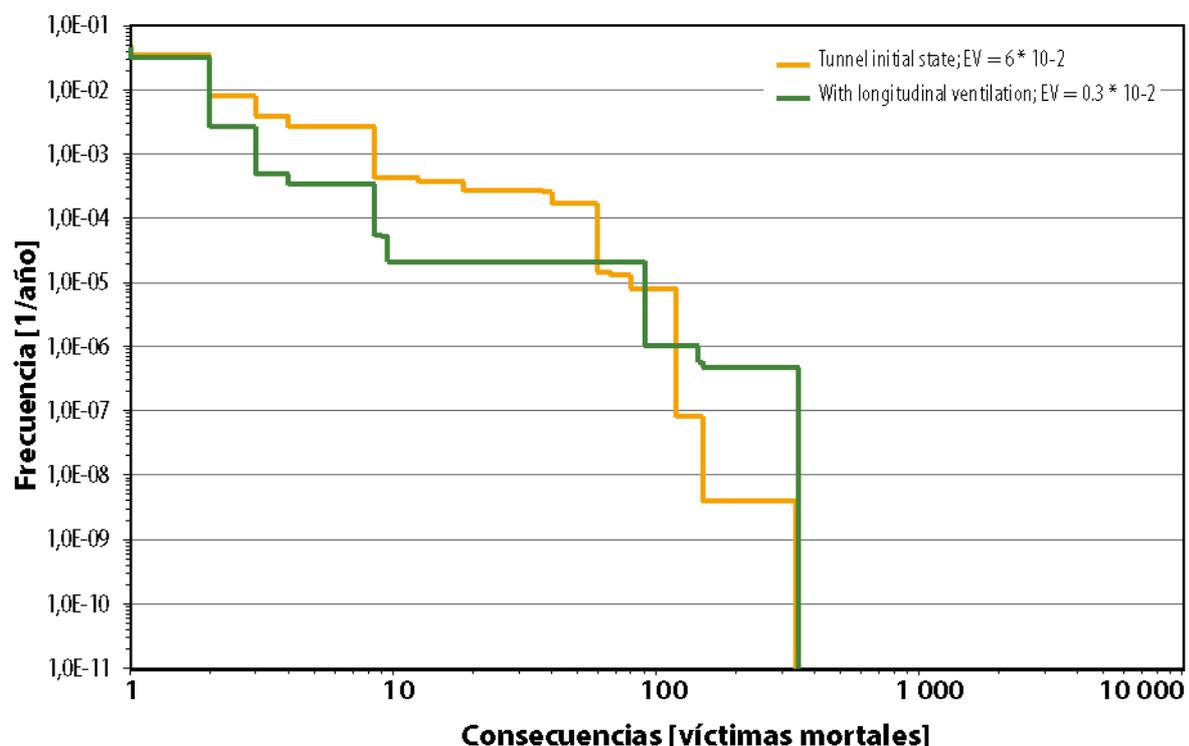


Ilustración 23 – Curvas F-N – representando el túnel en estado inicial y con medidas adicionales de seguridad (ejemplo)

El proceso de decisión puede ser descrito de la siguiente forma. Aunque los dos gráficos FN (azul: túnel inicial – rojo: ventilación longitudinal) se cruzan entre sí, se puede afirmar con claridad que existe una gran reducción de riesgo debido a la ventilación longitudinal, ya que los riesgos más elevados con ventilación sólo se refieren a escenarios de muy baja frecuencia (10^{-6} y más bajo) y se debe a una distribución más rápida del humo en la situación muy poco frecuente de un atasco dentro del túnel, que también puede ser prevenido con medidas organizativas. El EV indica claramente la mejora gracias a la ventilación longitudinal.

Segundo ejemplo

El transporte de mercancías peligrosas a través de un túnel tiene que ser investigado según las regulaciones ADR sobre túneles [4]. Los siguientes gráficos representan los riesgos debido al transporte de mercancías peligrosas en las siguientes situaciones:

- Categoría A: Todas las mercancías peligrosas están permitidas y pasan por el itinerario del túnel.
- Categoría B: Las mercancías peligrosas con códigos de restricción C, D o E pasan por el itinerario del túnel, y las mercancías con código B pasan por un itinerario alternativo. La curva existente es la suma de :
 - Riesgos en el itinerario del túnel de mercancías peligrosas que se les permite pasar por el túnel en ésta situación.
 - Riesgos en el itinerario alternativo, debido a las mercancías peligrosas que son prohibidas en el itinerario del túnel.
- Categoría C: Las mercancías peligrosas con código de restricción D o E pasan por el itinerario del túnel, y las mercancías con código B o C pasan por el itinerario alternativo. La curva expuesta es la suma de los riesgos de las mercancías en el itinerario del túnel y en el alternativo.
- Categoría D/E: Todas las mercancías peligrosas pasan por el itinerario alternativo.

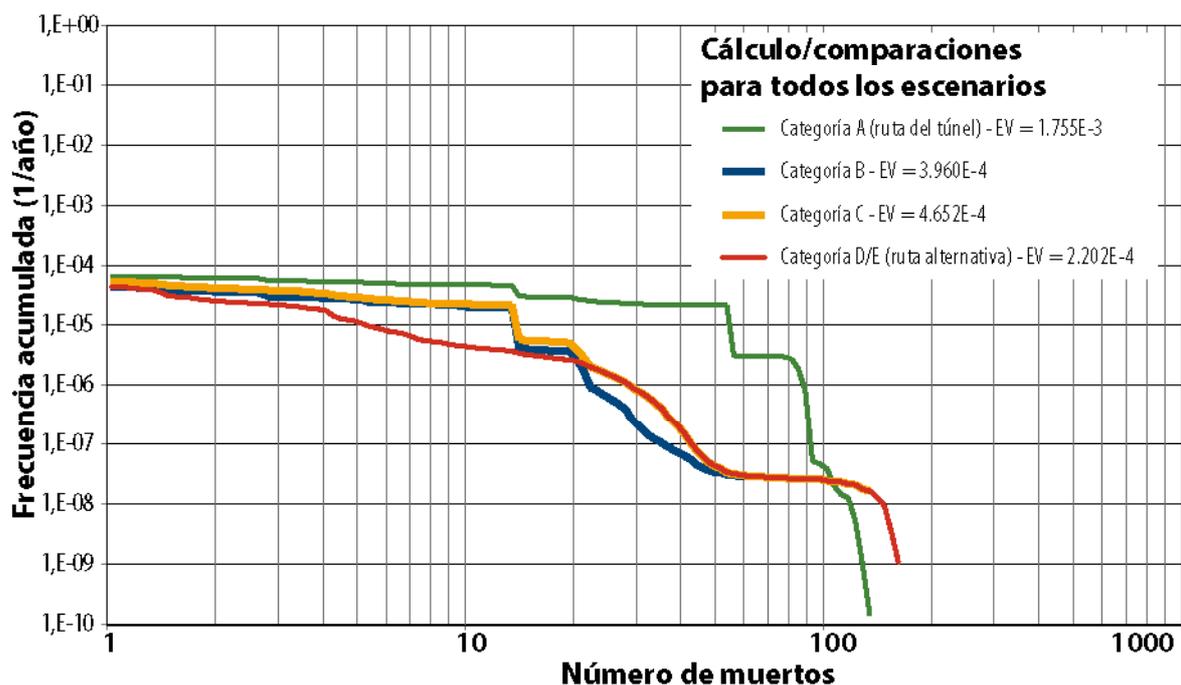


Ilustración 24 – Curvas F-N representando diferentes opciones respecto a las categorías de túneles para el transporte de mercancías peligrosas a través de túneles (únicamente riesgo de transporte de mercancías)

La interpretación de los resultados mostrados arriba es difícil debido a que las curvas se entrecruzan. En casos como este, la interpretación de las curvas F-N aisladamente no es suficiente, y la interpretación del EV también es necesaria.

En el presente ejemplo, se puede considerar que:

- Las curvas de las categorías B, C y D/E están muy juntas como para tomar una decisión.
- La curva de la categoría A está cerca de las otras 3 precedentes, tanto para los escenarios con un número reducido de víctimas (y mayor frecuencia) como para aquellos de mayores consecuencias (y frecuencias más bajas). No obstante, se muestra una diferencia significativa en las frecuencias para los escenarios con consecuencias promedio (por ejemplo, se muestra para consecuencias de 50 víctimas mortales o más una diferencia de más de 2 órdenes de magnitud).

La conclusión en esta situación para el túnel estudiado es que la elección de la categoría A debe evitarse, no siendo posible elegir entre las otras opciones (categoría B, C o D/E) basándose en esta comparación únicamente (los gráficos están muy cerca unos de otros – por lo tanto no hay diferencia significativa en el riesgo). En consecuencia se debe considerar otro criterio para tomar la decisión. El análisis de EV confirma este resultado basado en las curvas F-N.

Se debe tener en cuenta que en general las curvas que representan las categorías B, C o D se ubican entre las curvas correspondientes a las categorías A y E. Principalmente es el caso en el que el transporte de materiales derivados del petróleo representa la mayor parte de las mercancías peligrosas transportadas en el itinerario en el que se encuentra el túnel. Sin embargo, no siempre es así: las curvas intermedias pueden representar una situación en la que el riesgo haya sido mitigado, por ejemplo el caso en el que haya más líquidos tóxicos que lo usual en el tráfico de mercancías peligrosas y el túnel haya sido diseñado con un sistema para recoger específicamente los líquidos que puedan derramarse.

Experiencia práctica y debate

Éste enfoque comparativo es muy útil para la comparación de las alternativas y para la toma de decisiones basadas en el riesgo, si los resultados de un análisis de riesgos son representados como curvas F-N. Como se demuestra anteriormente puede emplearse para la selección de medidas adicionales de seguridad así como para la selección del itinerario más adecuado para el transporte de las mercancías peligrosas.

Sin embargo, se deben considerar los siguientes defectos de éste enfoque:

- Los gráficos FN son generalmente difíciles de interpretar y necesitan ser leídos con mucho cuidado, esos gráficos no son lineales pero son generalmente representados en una escala logarítmica doble con escalas considerablemente diferentes en la dirección horizontal y vertical.
- Si las imprecisiones son significantes y/o el registro de diferencias de las opciones comparadas es más bajo que el registro de incertidumbres y/o la comparación proporciona resultados ambiguos (por ejemplo, las curvas F-N se entrecruzan varias veces), entonces es difícil elegir entre las opciones estudiadas.

Para superar las carencias de éste enfoque, éste tipo de estrategia de evaluación de riesgos a veces necesita ser combinada con otros enfoques (tales como el análisis de la rentabilidad) o un criterio adicional (tal como una valoración suplementaria de los valores esperados). Un ejemplo de un proceso de evaluación de riesgos utilizando los valores esperados y/o las curvas F-N (como criterio absoluto) como criterio adicional en un procedimiento por etapas es el siguiente:

- Etapa 1: El EV o las curvas F-N para las diferentes opciones son comparadas con el criterio absoluto de riesgo para valorar si el nivel de riesgo de éstas opciones no es insignificante (verificación de que el nivel de riesgo calculado es más alto que un determinado umbral bajo) ni intolerable (verificación de que el nivel de riesgo calculado es más bajo que un determinado umbral alto).
- Etapa 2:
 - Si algunas opciones no se encuentran en el área inaceptable, y si todas las opciones no están en el área insignificante, se realiza una comparación entre las opciones que presentan un nivel de riesgo aceptable, como para elegir el que representa el nivel más bajo de riesgo.
 - Si todas las opciones se encuentran en el área insignificante, entonces el riesgo estimado no es un criterio de elección entre diferentes opciones, y se debe considerar otro criterio.
 - Si todas las opciones están en el área aceptable, entonces nuevas opciones deben ser consideradas, para encontrar al menos una opción que se pueda considerar como tolerable aceptable.

4.5. RENTABILIDAD

Definición del enfoque

El enfoque de rentabilidad considera la eficiencia de las medidas de seguridad comparadas con su potencial de reducción de riesgos. Como prueba la eficiencia de las medidas de seguridad desde un punto de vista económico, éste enfoque puede ser aplicado como criterio de aceptabilidad. De este modo, asegura que los recursos usados para reducir riesgos se utilicen de manera tal que se obtenga un nivel optimizado del mismo. Además, puede aplicarse para comparar y evaluar diferentes medidas de seguridad.

Aplicación práctica

El enfoque alemán de la guía RABT 2006 [26] para implementar los requerimientos para los análisis de riesgos comprende entre otros aspectos el enfoque de rentabilidad. Forma parte del proceso de planificación de las medidas de seguridad en caso necesario, por ejemplo si se tienen que considerar las medidas de seguridad alternativas cuando los requerimiento técnicos/infraestructurales de la RABT 2006 [26] no son satisfechos.

Las principales etapas del procedimiento son:

- Identificación de las medidas alternativas de seguridad o combinaciones de las mismas.
- Para las medidas alternativas planificadas, debe determinarse el efecto de reducción de riesgo así como los costes resultantes de su implementación y operación. Los costes anuales Kaño deben ser determinados para valorar las medidas alternativas planificadas de acuerdo a la rentabilidad. Estos abarcan:
 - Coste de (re-)inversión (K_{inversión}).
 - Coste anual de operación y mantenimiento (K_{operación}).

Los costes anuales resultantes se pueden calcular de la siguiente manera:

$$K_{\text{año}} = K_{\text{inversión}} \frac{(1+d)^n d}{(1+d)^n - 1} + K_{\text{operación}}$$

Dónde:

- $K_{\text{año}}$: Coste anual (€/año)
- $K_{\text{inversión}}$: Coste de inversión [€/km]
- $K_{\text{operación}}$: Costes de operación/mantenimiento (€/año)
- n : Ciclo de vida (años)
- d : Tasa de descuento / factor de anualidad [%] (típicamente en el margen de 2%)

Los costes de las medidas (específicos para cada proyecto) tienen que convertirse a costes anuales de la misma manera que los riesgos o reducciones de los mismos.

- Para la determinación del riesgo monetario (víctimas mortales), se aplica un coste marginal de 10 millones de € para escenarios de incendio y 5 millones de € para escenarios de colisión por cada vida salvada. Para el riesgo de la infraestructura, se aplica un coste marginal de 3 € por cada € de daño impedido. Los factores de aversión al riesgo j también se incluyen.
- Para la evaluación, se tiene que considerar el coste de inversión inicial y el coste de operación y mantenimiento anual. En base a ello se puede obtener el coste anual, incluyendo el ciclo de vida de la(s) medida(s) de seguridad analizada(s) y una tasa de descuento.

Para la toma de decisiones se define el siguiente criterio basado en el índice de rentabilidad (K/R) siendo K los costes anuales (€/año) y R la reducción del riesgo monetario (€/año):

- $K/R < 1$: Se deben implementar las medidas de seguridad.
- $1 \leq K/R < 2$: La implementación debe examinarse caso a caso
- $K/R \geq 2$: Medidas de seguridad no rentables

Experiencia práctica y debate

Debido a que la inclusión en la normativa alemana RABT 2006 [26] de la metodología para la implantación de los requerimientos de los análisis de riesgo se realizó en el verano de 2009, solo existen algunas experiencias prácticas en este país.

En otros países hay actualmente muchas aplicaciones prácticas. Por ejemplo en los Países Bajos [27] se ha realizado una estimación de rentabilidad para dos casos prácticos. Uno de ellos es un túnel ya construido cerca de la ciudad de Roermond en la autopista A73, de dos tubos (2x2 carriles) y una longitud de 2.040 m. El segundo caso se trata de un estudio de viabilidad llevado a cabo para la construcción de un túnel de dos tubos de 7 km de longitud (2x3 carriles) para conectar las dos intersecciones de las rutas A6 y A9 cerca de Amsterdam. A ambos se les conoce como túneles de "categoría 0" que significa que no se aplica limitación alguna para el transporte de mercancías peligrosas y para ambos se ha estudiado la rentabilidad de la instalación de un sistema de rociadores de agua. Basados en la experiencia, el coste de dicho sistema se estima en aproximadamente 10 millones de € por kilómetro de túnel. Los efectos de reducción de riesgos por la instalación del sistema de rociadores se han analizado con el modelo alemán TUNPRIM. Con este modelo cuantitativo de análisis de riesgo se evaluó el riesgo interno para los usuarios. El estudio llegó a la conclusión de que a partir de los resultados del análisis de rentabilidad, estas medidas de seguridad no eran las idóneas para estos túneles. Por supuesto que las conclusiones para otros túneles pueden ser diferentes.

La aplicación del enfoque de rentabilidad es una manera factible de llevar la seguridad del túnel a un estado óptimo desde un punto de vista económico, lo que ayuda a alcanzar la máxima eficiencia en términos de prevención de riesgo y recursos utilizados. En comparación con los criterios de aceptabilidad – definidos para EV o un diagrama FN – presenta el defecto

de ser un procedimiento a menudo difícil en la determinación del coste marginal y sólo en parte puede basarse en datos científicos, en un sentido más restringido.

4.6. ANÁLISIS DE ESCENARIOS

Definición del enfoque

El análisis de riesgo basado en el escenario es una herramienta muy útil como complemento de los requerimientos de normativas, regulaciones y guías. Para túneles en fase de proyecto, en fase previa a la puesta en servicio y en particular para túneles en servicio, un paso importante en la investigación de seguridad puede ser la definición de la condición de referencia, es decir, los objetivos a lograr en términos de rendimiento interactivo de varios sistemas de seguridad. El análisis de riesgo basado en un escenario puede utilizarse para investigar si el sistema compuesto por la infraestructura reacciona con la seguridad esperada con respecto a la forma en la que es utilizada por los usuarios (basándose en el retorno de la experiencia), la forma en la que se realiza la explotación y la forma en la que se organiza el rescate. Sin embargo, hay una gran variedad de enfoques distintos en un análisis de riesgo basado en un escenario por lo que las definiciones en este capítulo no pueden ser exhaustivas.

Aplicación práctica

En los túneles nuevos, proyectados de acuerdo a los requerimientos normativos, puede existir una pequeña necesidad de debate sobre los requerimientos de infraestructura y los del equipamiento de seguridad previsto. No obstante, puede añadirse la cuestión de la organización de la supervisión, la explotación y la respuesta ante emergencias. Sin embargo los requerimientos normativos para túneles nuevos no son sistemáticamente aplicables a los túneles existentes. Por ello es necesario un procedimiento específico para definir una condición de referencia que pueda considerarse como aceptable para cumplir unos objetivos de seguridad. En este procedimiento pueden aplicarse como herramientas de evaluación las técnicas de análisis de riesgo basadas en un escenario. Un ejemplo de tal proceso se ilustra a continuación en la *ilustración 25*



Ilustración 25 – Ejemplo de proceso en túneles en servicio para definir un nivel aceptable de seguridad, aplicando un análisis de riesgo basado en el escenario

Los gráficos espacio-tiempo son útiles para la presentación de resultados de los análisis de escenarios. En la *ilustración 26* debajo, se muestra una figura de una posible representación de los efectos de la temperatura de un incendio de 100 MW de un vehículo pesado en un túnel unidireccional con ventilación longitudinal.

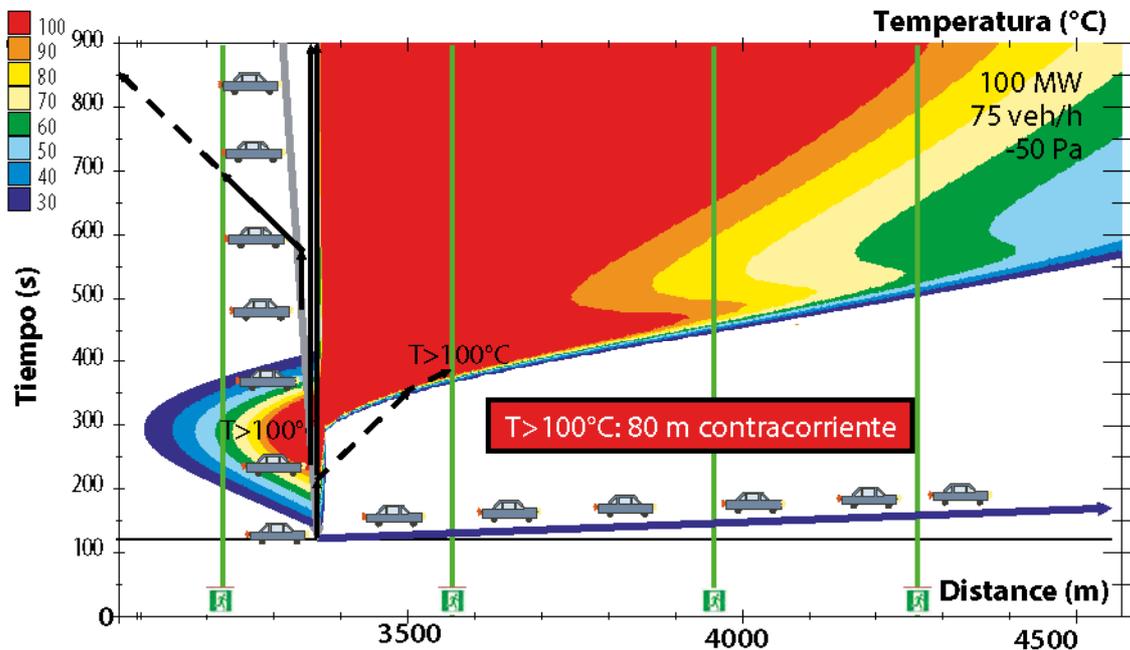


Ilustración 26 – Ejemplo de gráfico espacio-tiempo representativo de un incendio de vehículo pesado

Este gráfico muestra que, una vez en funcionamiento, la ventilación longitudinal es capaz de empujar el humo con la corriente para que los vehículos bloqueados aguas arriba del fuego sean finalmente mantenidos en un ambiente seguro. No obstante, si el sistema de ventilación no es accionado rápidamente, o si hay una presión adversa significativa en las bocas, entonces existe un riesgo de propagación del humo del incendio en la zona donde se encuentran los vehículos bloqueados.

Durante ésta primera fase, los usuarios que evacúan el túnel pueden verse envueltos por el humo hasta que los ventiladores están funcionando al 100% y el humo sea empujado en el sentido del tráfico. Las consecuencias dependerán entonces de:

- Condiciones iniciales (tráfico y diferencia de presión).
- Tiempo de activación de las acciones correspondientes (especialmente de ventiladores).
- Potencia de incendio en MW.
- Número y comportamiento de los usuarios.
- La localización del incendio.

Este tipo de situación con invasión temporal de humo sobre la zona de vehículos bloqueados puede potencialmente ocurrir en todos los túneles con ventilación longitudinal y es generalmente considerada aceptable en túneles interurbanos (debido a la muy baja probabilidad de un incendio completamente desarrollado bajo tales condiciones tan desfavorables), a condición de que el operador del túnel pueda garantizar una respuesta rápida y conveniente a las situaciones de emergencia posibles.

De lo contrario, la conclusión sería que son necesarias medidas adicionales de seguridad para mejorar el tipo de situación ilustrada por el escenario investigado. Por ejemplo:

- En su caso: la adición de un sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI), como ayuda al operador a fin de identificar rápidamente cualquier incidente de tráfico.
- Modificación del protocolo de respuesta aplicado por el operador a fin de:
 - En primer lugar, encender todos los ventiladores en caso de cualquier tipo de evento inesperado en el túnel, previamente a la clasificación de dicho evento.
 - Luego, clasificar el evento inesperado, y, si se comprueba que no es un incendio, apagar el sistema de ventilación de emergencia.
- Instalación de barreras automáticas en cada portal, para limitar el número de vehículos atrapados en las inmediaciones del incendio.

Experiencia práctica y debate

Los análisis de riesgo con enfoque basado en el escenario pueden proporcionar una *ilustración* útil de riesgos específicos. La evaluación de riesgos basada en un análisis de escenarios tiene ventajas y desventajas respecto al enfoque basado en el análisis del sistema.

Las principales ventajas son:

- Tratar con situaciones específicas bien definidas permite una mejor comprensión de los riesgos específicos asociados para el Director de explotación del túnel, el operador del túnel y los servicios de rescate. Aprender de tales análisis puede ayudar en la preparación de planes de respuesta de emergencia apropiados.
- Si es necesario, dicho análisis permite la adaptación de algunos parámetros, desde un punto de vista organizacional y/o de diseño, para así mejorar los puntos débiles y limitar los efectos adversos identificados.
- La representación de los riesgos es ilustrativa y puede ser comunicada más fácilmente, sin el efecto "caja negra".

Las principales desventajas son las siguientes:

- La evaluación y la aceptabilidad de riesgo se basa principalmente en el criterio de expertos, que puede variar de persona a persona.
- Sólo unas pocas situaciones pueden ser investigadas de esta manera, de forma que las conclusiones derivadas no deben aplicar de una forma cuantitativa a otras situaciones más genéricas.
- Es importante seleccionar cuidadosamente los escenarios representativos – de otra manera las conclusiones extraídas podrían estar enfocadas en aspectos equivocados.