

LA EVALUACIÓN DE RIESGOS COMO HERRAMIENTA PARA LA TOMA DE DECISIONES PARA MEJORAR LA SEGURIDAD DE LOS TÚNELES

Bernhard Kohl, ILF Consulting Engineers, Austria

Jefe de la sucursal de ILF en Linz; Co-líder del Grupo de Trabajo "Seguridad" en el Comité Técnico de la AIPCR D.5 "Operaciones en túneles viales".

1 ANTECEDENTES DE LA TOMA DE DECISIONES BASADA EN EL RIESGO

Muchos países, en particular aquellos con una larga tradición en la operación de túneles viales, han desarrollado un marco de pautas y reglamentos para el diseño, la construcción y la operación de los túneles viales. Las pautas suelen incluir un conjunto de medidas de seguridad prescritas para las categorías de túneles y a menudo se centran en especificaciones técnicas de diseño con el fin de establecer un cierto nivel de estandarización y garantizar un rendimiento adecuado de los diversos sistemas técnicos. Aunque las pautas pretenden brindar un nivel de seguridad unificado, en realidad el nivel de seguridad resultante podría diferir de un túnel a otro. Además, incluso si un túnel cumple con todos los requisitos reglamentarios, existen riesgos residuales que en el enfoque tradicional prescriptivo de la seguridad no son obvios y no se abordan de manera específica [1].

Aunque a veces las pautas parecen proporcionar un marco rígido, la experiencia práctica demuestra que existen muchas opciones para optimizar las medidas de seguridad de los túneles, por ejemplo, desde una perspectiva de rentabilidad. Sin embargo, esto requiere de una herramienta que sea capaz de cuantificar los efectos de las medidas de mitigación de riesgos en la seguridad de los túneles, ya que el enfoque normativo tradicional no tiene en cuenta la eficacia de las medidas prescritas en un caso específico.

Por lo tanto, las normas de seguridad modernas también tienen en cuenta la evaluación de la eficacia de las medidas de seguridad. La Directiva 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles viales contiene tres elementos relacionados con el concepto de eficacia de las medidas de seguridad en los túneles [10]:

- El anexo I incluye una lista de medidas mínimas de seguridad que distingue entre medidas de infraestructura y medidas relativas a las operaciones; de este modo se define un nivel mínimo de seguridad, el cual puede tomarse como referencia para una evaluación cualitativa o cuantitativa de la seguridad.
- En el artículo 13 se introduce la evaluación del riesgo como herramienta práctica para la evaluación de la seguridad de los túneles, por consiguiente, se establece un enfoque basado en el riesgo además del enfoque tradicional prescriptivo.
- El Anexo I también introduce el principio de equivalencia. Cuando existan razones justificadas para no aplicar las medidas exigidas por la Directriz (condiciones restrictivas, costos desproporcionados, etc.), se permitirán medidas alternativas siempre que se pueda demostrar que es posible alcanzar el mismo nivel de seguridad (o un nivel superior). Esto tiene que estar respaldado por una evaluación de riesgos.

Lo anterior define el marco para evaluar la eficacia de las medidas de mitigación de riesgos en los túneles viales mediante la aplicación de un enfoque basado en el riesgo.

Los enfoques basados en el riesgo permiten identificar y evaluar las medidas de seguridad adicionales pertinentes con el propósito de mitigar los riesgos. Sin embargo, un enfoque



basado en el riesgo no puede sustituir a las especificaciones técnicas de diseño. Por ejemplo, los resultados de un análisis de riesgos pueden ayudar a definir los requisitos funcionales de un sistema de ventilación de un túnel. Para garantizar un rendimiento adecuado de la ventilación, deben definirse los procedimientos de diseño y los parámetros de diseño (por ejemplo, el tamaño de diseño del incendio) a fin de establecer un enfoque de diseño unificado, lo que normalmente se realiza en forma de una directriz técnica de diseño. Por consiguiente, el enfoque prescriptivo y el enfoque basado en el rendimiento deben considerarse como elementos complementarios del proceso de evaluación de la seguridad [1].

2 HERRAMIENTAS PARA LA TOMA DE DECISIONES BASADA EN EL RIESGO

La capacidad de evaluar la eficacia de las medidas de mitigación de riesgos es crucial para la toma de decisiones, tanto en la fase de diseño de un nuevo túnel como en la de mejora de un túnel ya existente, si se dispone de varias soluciones alternativas para aumentar la seguridad y es preciso encontrar una solución óptima (por ejemplo, en términos de rentabilidad).

Es posible que se requieran medidas alternativas o adicionales por diversas razones, por ejemplo:

- Para contrarrestar la influencia de factores específicos que aumentan el riesgo, como la congestión frecuente en un túnel urbano o una pendiente elevada que supera un valor de referencia definido.
- Para compensar las deficiencias en la construcción o el equipamiento de un túnel existente, por ejemplo, en el curso de un proceso de mejora.

2.1 Enfoque General

En un enfoque basado en el riesgo, se proporciona un enfoque integrado de la seguridad de los túneles mediante el análisis sistemático de las emergencias, normalmente mediante la aplicación de técnicas de escenarios; se abordan tanto las probabilidades de los escenarios como sus consecuencias. Se puede lograr una cuantificación de los riesgos combinando la probabilidad y las consecuencias de cada escenario. Resumiendo los riesgos parciales de todos los escenarios se puede calcular el riesgo global de un túnel [1] [9]. Este enfoque también incluye escenarios que pueden no haber sucedido todavía (y que por lo tanto no están cubiertos por la experiencia), pero que pueden suceder y pueden tener consecuencias importantes. Sin embargo, no todos los efectos pueden cuantificarse y un enfoque basado en el riesgo también puede centrarse en preguntas específicas o escenarios específicos sin investigar todo el rango de posibles incidentes. Por lo tanto, se han desarrollado diferentes métodos que se aplican en la práctica, y la selección del método más adecuado para investigar determinadas problemáticas tiene que ajustarse al problema específico, a la profundidad de evaluación requerida y a los recursos disponibles.



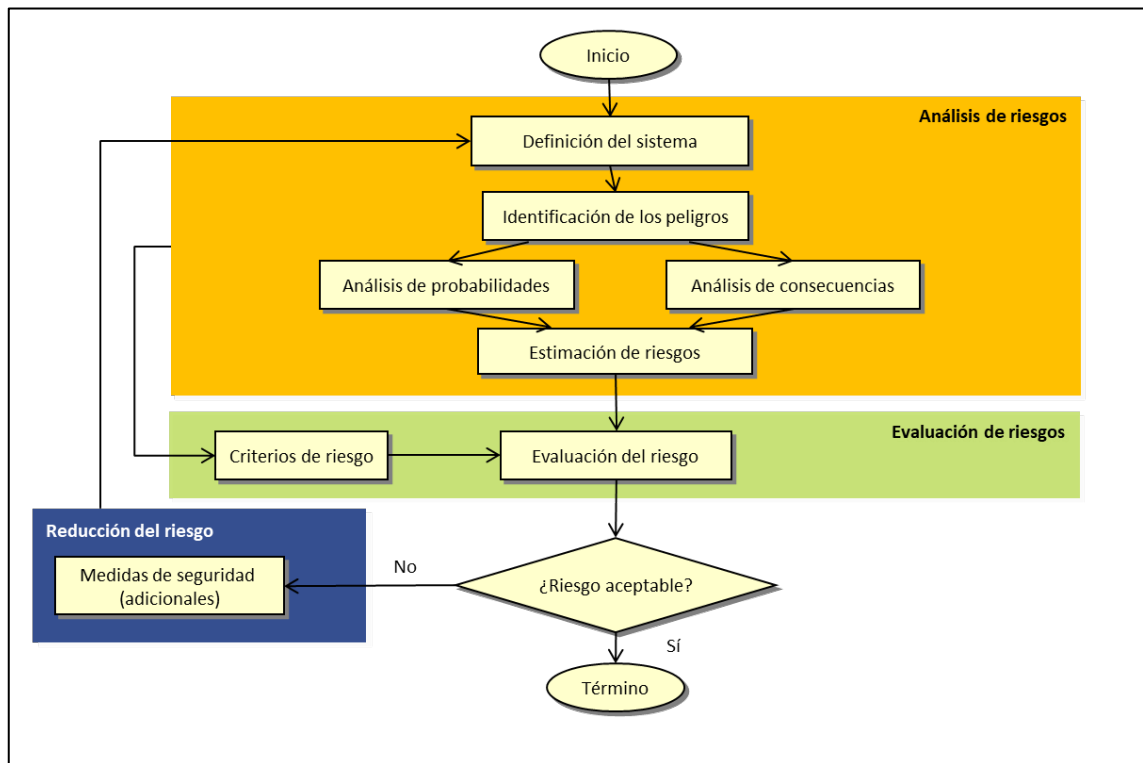


Fig. 1: Proceso de evaluación de riesgos [1]

Los riesgos pueden abordarse de forma cuantitativa o cualitativa. Los métodos cualitativos generalmente se centran en el análisis funcional de la secuencia de eventos y la interacción de las personas, los sistemas y los procedimientos. Con los métodos cuantitativos se pueden calcular los valores de riesgo característicos para todo el túnel. El indicador cuantitativo de riesgo más común es el de víctimas (muertos y heridos) en relación con el grupo de usuarios del túnel.

Dado que existen varias herramientas que pueden aplicarse en la práctica, es crucial seleccionar la mejor metodología disponible para un problema específico. Para poder evaluar el efecto específico de una medida individual de mitigación de riesgos, la metodología aplicada debe ser sensible a las modificaciones de la funcionalidad de las características de seguridad del túnel influenciadas por esta medida específica. Las medidas eficaces de mitigación de riesgos pueden intervenir en varios puntos de la cadena de eventos de un tipo específico de incidente. Para cuantificar el efecto global, la metodología aplicada debe ser capaz de modelar todos estos efectos de manera realista. Es más, en algunos casos se requiere de datos de entrada específicos a un nivel detallado para una modelización coherente.



Fig. 2: Cierre efectivo del túnel impuesto por las barreras, Túnel de Lioran (Francia) © CETU

Por ejemplo, si se necesita evaluar la medida "cierre rápido y eficaz de un túnel en caso de incendio", hay varios aspectos que deben tenerse en cuenta:

- Para implementar la detección rápida de incidentes en una evaluación de riesgos, el enfoque debe ser capaz de modelar la influencia del tiempo en la respuesta de emergencia (la activación del cierre del túnel, la activación del modo de emergencia de la ventilación, etc.); adicionalmente, se requiere información cuantitativa sobre hasta qué punto un sistema de detección mejorado es capaz de reducir el tiempo (promedio) de detección.
- Se requiere un modelo de tráfico que sea capaz de representar un cambio en la configuración del tráfico (menos vehículos haciendo cola cerca del lugar del incidente, más vehículos deteniéndose en lugares situados a mayor distancia o fuera del túnel).
- Un modelo de propagación de fuego y humo capaz de simular la propagación de humo a través del túnel en función del tiempo. En el mejor de los casos se trata de un modelo transitorio capaz de tener en cuenta el efecto de las influencias variables sobre el flujo de aire longitudinal (como los movimientos de los vehículos en la primera fase del incidente, la puesta en marcha y el control del sistema de ventilación durante el incidente del incendio, el efecto de flotabilidad o empuje del fuego, etc.).

En muchos casos, esto requiere un modelo de riesgo que provea un conjunto integrado de varias herramientas de simulación.

Durante la última década, se han elaborado e implementado diferentes métodos de análisis de riesgos en las pautas a nivel nacional. Se puede encontrar una documentación de los métodos más comunes en dos informes de la AIPCR, "Análisis de riesgos para túneles viales" [2] y "Prácticas actuales para la evaluación de riesgos en túneles viales" [1].

La mejora continua de algunas de estas herramientas ha ampliado mucho su aplicabilidad para la toma de decisiones. Sin embargo, el ejemplo proporcionado también deja claro que la calidad de los resultados depende de dos parámetros clave:

- La idoneidad de la herramienta de evaluación de riesgos aplicada a un problema específico.
- La disponibilidad y calidad de los datos de entrada para un tema específico.

2.2 Concepto de evaluación de la eficacia de las medidas de mitigación de riesgos

El proceso de evaluación de la eficacia de las medidas de mitigación de riesgos consta típicamente de 4 pasos [10]:

- En una **primera fase** se debe identificar y analizar los problemas específicos de un túnel individual con respecto a la seguridad de los usuarios. En un primer enfoque, esto normalmente se realiza mediante un análisis cualitativo de seguridad.
- En la **segunda fase** es necesario encontrar medidas adecuadas que puedan mitigar o compensar los problemas identificados en la primera fase bajo las condiciones específicas del túnel investigado, teniendo en cuenta los factores de diseño, las condiciones de tráfico y las características del tráfico, además de las condiciones de operación.
- En la **tercera fase** es necesario analizar cómo actúa la medida en el túnel en cuestión sobre el riesgo causado por los problemas específicos, incluyendo todos los efectos de interacción relevantes. Al principio, este paso debe realizarse cualitativamente a un nivel detallado. La cuantificación de los efectos puede basarse en datos (mediciones, estadísticas), en consideraciones teóricas, en la experiencia práctica o en el juicio de expertos.
Para problemas más complejos, como la respuesta a un incidente de incendio, puede ser indispensable utilizar herramientas de simulación complejas, como la simulación de propagación de humo CFD o la simulación de salida. En este caso es necesario modelar toda la cadena de eventos con la suficiente precisión. La eficacia de las medidas adicionales puede evaluarse modificando los parámetros del modelo que se ven influenciados por la medida.
- Una vez evaluada la eficacia de una medida de reducción del riesgo (o de un conjunto de medidas de este tipo) a un nivel detallado, en la **cuarta fase** se debe estudiar el efecto de la medida en el nivel general de seguridad del túnel. Esto puede hacerse analizando la funcionalidad de la medida con respecto a un conjunto representativo de escenarios potenciales de incidentes.

Para una aplicación eficaz y coherente de este concepto, es altamente recomendable la aplicación de una herramienta probada de evaluación de riesgos basada en sistemas [1], [2], [3], [5], [6]. Todos los efectos pueden cuantificarse en un modelo de este tipo, proporcionando así información sobre la eficacia general de una medida específica de mitigación de riesgos. Además, se puede realizar un estudio cuantitativo sistemático de los efectos sobre la seguridad de todas las medidas en cuestión, proporcionando así información para otros estudios, como un análisis de rentabilidad para las medidas de mitigación de riesgos en cuestión. Toda esta información puede utilizarse en un proceso

de optimización destinado a aumentar la seguridad del túnel hasta el nivel requerido, al mismo tiempo que se equilibran los costos y otros efectos relevantes.

3 EJEMPLO PRÁCTICO DE UNA TOMA DE DECISIONES BASADA EN EL RIESGO

3.1 Descripción del problema

El estudio de caso presentado en este trabajo trata de un problema específico en la operación de un túnel unidireccional que está expuesto a vientos extremos durante las estaciones con condiciones climáticas específicas.

El túnel unidireccional está equipado con un sistema de ventilación longitudinal que ha sido diseñado teniendo en cuenta, en la medida de lo posible, las condiciones meteorológicas. Sin embargo, estudios previos demostraron que la ventilación no es capaz de alcanzar los objetivos de diseño en situaciones de viento extremas. Por consiguiente, si se produce un incidente de incendio en una situación de este tipo, puede ocurrir que el humo se propague contra la dirección de conducción y contra la dirección de ventilación, poniendo en peligro a las personas que se encuentran en los vehículos que hacen fila detrás del sitio donde se produce el incendio.

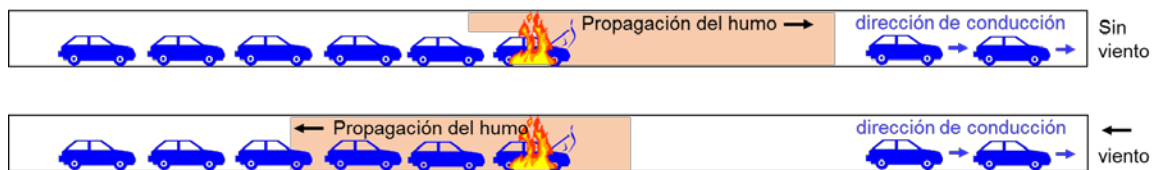


Fig. 2: Cambio en la dirección de propagación del humo en caso de viento extremo en el portal del túnel

Como todas las opciones para mejorar el sistema de ventilación aparentemente ya se habían agotado, surgió la idea de estudiar medidas alternativas de mitigación de riesgos con un modelo de evaluación de riesgos para hacer frente a esta situación. En particular, se debe proporcionar algunos criterios de decisión al operador, como base para una decisión sobre las medidas operativas que podrían incluso consistir en el cierre temporal del túnel. Estos criterios de decisión deben basarse en parámetros medibles.

Como metodología de evaluación de riesgos adecuada se seleccionó el modelo austríaco de riesgo de túneles "TuRisMo" [6]. La metodología austríaca utiliza un enfoque totalmente integrado que permite el análisis detallado de muchos tipos de medidas de seguridad y de las interacciones entre estas diferentes medidas. Se tienen en cuenta de forma rigurosa factores como el equipo de seguridad instalado y las condiciones límite. El método combina un análisis cuantitativo de frecuencia basado en evaluaciones estadísticas y un análisis cuantitativo de consecuencias que incluye: (i) una parte (mecánica) de sólo colisión y (ii) un modelo distinto de consecuencias de incendio. La figura 1 muestra una representación esquemática de la estructura general del método. Los detalles de los diversos submodelos del método global se han presentado en otras partes [4], [5] y [6] y no se reproducen en este documento.

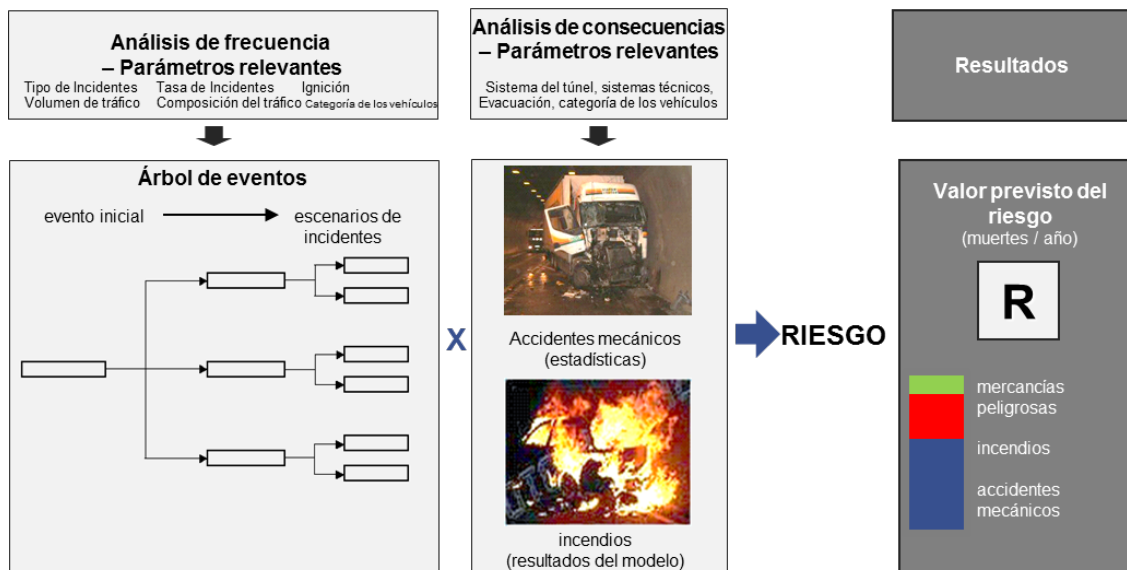


Fig. 3: Representación esquemática de la metodología TuRisMo

El modelo de consecuencias del incendio utilizado en la investigación de las estrategias de ventilación de emergencia puede ser resumido como sigue [7]:

- Cada escenario de incendio distinto se considera explícitamente en un árbol de eventos y se genera un conjunto de escenarios detallados con parámetros locales variables basados en la distribución de la probabilidad de los parámetros de influencia;
- El desarrollo previsto de las velocidades longitudinales del flujo de aire se utiliza como condición límite en una simulación tridimensional de CFD (FDS) en la que se examinan los efectos locales tales como el retroceso del humo ("backlayering") y la estratificación del humo;
- Las concentraciones de visibilidad, calor y gas tóxico generadas en la simulación tridimensional de CFD se combinan a continuación con las distribuciones de la exposición de las personas en función de la configuración del tráfico tras el incidente;
- A partir de esta superposición y utilizando un modelo de acumulación e intoxicación que describe los efectos de los riesgos de incendio sobre la velocidad de evacuación y la supervivencia de las personas [6], se calcula el número total esperado de víctimas fatales. A continuación, se repite todo el proceso para el siguiente escenario detallado

Enfoque basado en el riesgo para el desarrollo de los criterios de decisión

Este estudio de caso ha sido elegido porque resulta muy adecuado para demostrar de manera ilustrativa los desafíos de la toma de decisiones basada en el riesgo:

- Para la toma de decisiones basada en el riesgo se necesitan algunos criterios de referencia del riesgo bien argumentados y aplicables en la práctica.
- Hay que encontrar una manera de cuantificar la influencia de las características específicas de un túnel en el riesgo de los usuarios del túnel, en este caso el fuerte viento.

- El enfoque debe ser aplicable en la práctica: en este caso, el operador del túnel necesita una herramienta que se base en parámetros medibles en tiempo real, que estén a su disposición.

3.1.1 Criterios de riesgos de referencia

Es difícil dar consejos generales sobre cómo elegir los criterios de referencia de riesgo adecuados, pero en este caso específico se explica bien cómo se puede hacer.

Este túnel ha sido anteriormente objeto de un estudio de evaluación de riesgos, sin abordar específicamente el problema del viento. El resultado es que este túnel es suficientemente seguro teniendo en cuenta la configuración del túnel, el equipamiento, la situación del tráfico y los aspectos operativos. Por lo tanto, ya existe un valor cuantitativo de riesgo para este túnel, que es aceptable.

Sin embargo, este valor de riesgo es un valor de riesgo promedio para un año, basado en el AADT para el túnel y otras condiciones promedio. En un análisis más detallado, queda claro que, desde una perspectiva temporal, el riesgo no es constante sino que varía a lo largo del tiempo: hay períodos de tiempo en los que cae por debajo del valor promedio y otros períodos en los que se excede el valor promedio. Dado que un determinado valor de riesgo se considera aceptable como valor promedio para un año, también sería aceptable un nivel de riesgo más elevado, pero sólo por un tiempo limitado. Dado que el tráfico es el parámetro clave para esta variación, sería posible obtener un nivel de riesgo aceptable para un período de tráfico elevado definido [11].

Suponiendo que el período con situación de viento crítica dure, por ejemplo, 30 días, podría elegirse como valor de referencia el nivel de riesgo de un volumen de tráfico que se supere en 30 días del año. Por supuesto, también podría tomarse como referencia el valor promedio de riesgo, pero este sería un requisito mucho más estricto.

La definición de un valor de riesgo de referencia adecuado es crucial para todo el proceso y, por lo tanto, debe discutirse y acordarse con las personas responsables del operador del túnel y, tal vez también con las autoridades.

3.1.2 Implementación práctica

En conversaciones con los operadores del túnel se descubrió que existen 2 parámetros clave:

- que son medibles en tiempo real, y
- que tienen una influencia significativa sobre el nivel de riesgo.

Estos parámetros son el volumen de tráfico en tiempo real (vehículos/h) y la velocidad del flujo de aire en tiempo real dentro del túnel. Utilizando estos parámetros, se puede elaborar una matriz calculando un valor de riesgo por hora para cada combinación relevante de volumen de tráfico y velocidad de flujo de aire. Esto puede hacerse aplicando repetidamente el modelo de riesgo.

Comparando el valor de riesgo resultante con el valor de riesgo de referencia definido anteriormente, se puede distinguir entre situaciones que son suficientemente seguras (nivel de riesgo inferior al nivel de riesgo de referencia) y situaciones que requieren medidas operativas adicionales (nivel de riesgo superior al nivel de riesgo de referencia). Este enfoque separa la matriz en dos partes: un conjunto de combinaciones de



parámetros que son seguros (parte verde en la Fig. 5) y una combinación de parámetros que es crítica.

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de una matriz de este tipo. Los números en esta matriz representan el riesgo de incendio del tubo del túnel afectado por el fuerte viento. En este ejemplo, el valor de referencia (número rojo en la parte superior de la columna gris) se ha calculado sobre la base del AADT, lo que representa el valor promedio del riesgo de incendio por hora de este túnel.

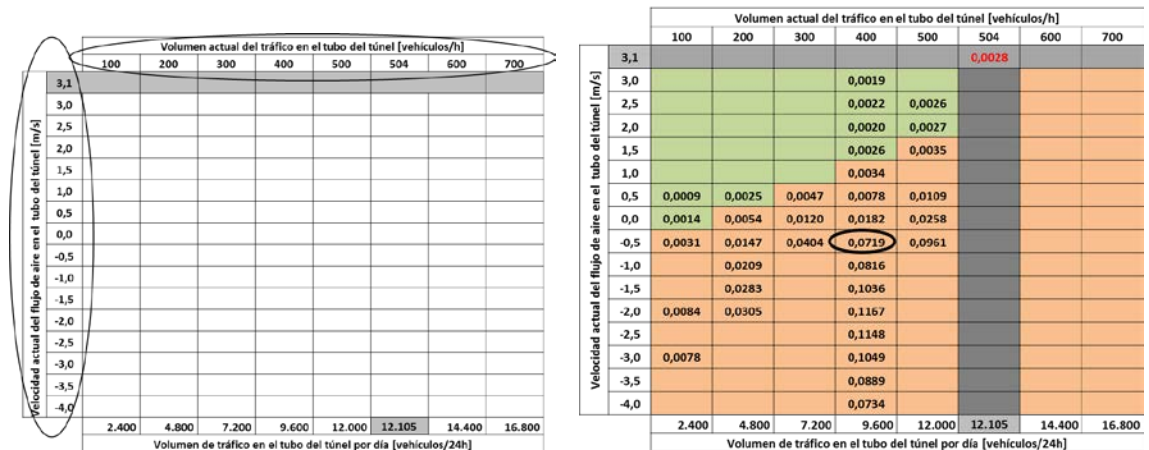


Fig. 4: Estructura de la matriz para la toma de decisiones con línea de referencia basada en el riesgo de incendio.

La Fig. 6 muestra la relación entre el riesgo de incendio y la velocidad del flujo de aire longitudinal para un valor de tráfico de 400 vehículos/h (lado izquierdo) y la propagación longitudinal del humo de una correspondiente velocidad del flujo de aire (-0,5 m/s).

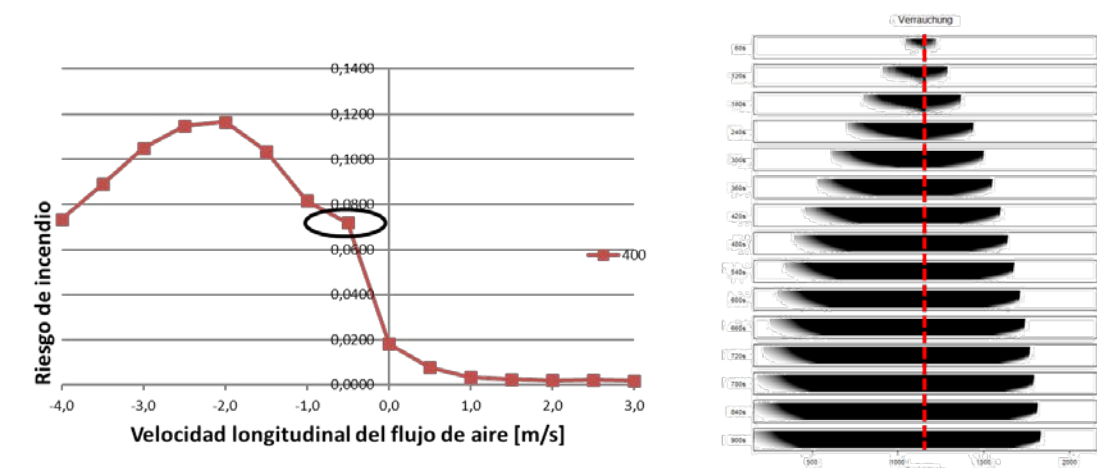


Fig. 6: Resultados detallados: Riesgo de incendio (volumen de tráfico de 400 vehículos/hora) en función de la velocidad del flujo de aire longitudinal y de la propagación del humo para un flujo de aire longitudinal de -0,5 m/s.

Este ejemplo demuestra los principios del enfoque. En realidad, la situación es más compleja. Para una correcta comprensión se explica que, como medida adicional, la ventilación se opera a toda velocidad en caso de fuertes vientos esperados. Por lo tanto,

el efecto de la ventilación ya está incluido en la velocidad del flujo de aire longitudinal resultante (como todos los demás efectos, tales como los movimientos del vehículo, el viento, etc.). Para el cálculo del riesgo en esta aplicación específica, la velocidad del flujo de aire se asume como constante y no se modela la interacción del viento con todos los demás parámetros. Esta importante simplificación es posible porque sólo la velocidad del flujo de aire resultante es relevante para el riesgo y este valor se mide en tiempo real y, por lo tanto, no es necesario simularlo.

Naturalmente, también es posible incluir medidas adicionales en este enfoque que podrían influir en la línea de referencia de la matriz o, si no se tienen en cuenta para la toma de decisiones, reducir el riesgo resultante en todos los casos.

4 RESUMEN Y CONCLUSIONES

Este documento presenta los antecedentes y los principios de la toma de decisiones basada en el riesgo, aplicando herramientas modernas de evaluación de riesgos. Describe el proceso a seguir para evaluar los efectos de las medidas adicionales de mitigación de riesgos de manera cuantitativa y explica cómo se puede utilizar este enfoque en la práctica. Para ilustrar los principios, se presenta el examen de un túnel que periódicamente está expuesto a vientos extremos. En caso de un incidente de incendio, el efecto de la ventilación en caso de incendio puede verse considerablemente perjudicado por estas influencias.

El estudio de caso explica el desarrollo de una herramienta sencilla de toma de decisiones para la operación de túneles que se elabora mediante la aplicación de un modelo de riesgo avanzado. Aplicando esta herramienta, el operador del túnel puede decidir la activación de medidas operacionales en situaciones críticas, basándose en parámetros medibles. El ejemplo también demuestra la gran flexibilidad de este enfoque basado en el riesgo, que puede adaptarse a una amplia gama de temas relevantes para la toma de decisiones en el contexto de la seguridad de los túneles viales.

5 REFERENCIAS

- [1] Informe AIPCR 2012R23: Prácticas actuales para la evaluación de riesgos en túneles viales, Paris 2013.
- [2] Informe AIPCR 2008R02: Análisis de riesgo para túneles viales.
- [3] Kohl B: El nuevo modelo austríaco de riesgo de túneles TuRisMo2: una herramienta para la optimización del diseño y la operación de los túneles viales; actas del seminario del CT 3.3 de la AIPCR "Operaciones binacionales de túneles viales de montaña" en San Juan, Argentina, abril de 2015.
- [4] Nakahori I, Sakaguchi T, Kohl B, Forster C y Vardy AE, "Evaluación de riesgos de la estrategia de ventilación de flujo cero para incendios en túneles bidireccionales con ventilación longitudinal", 16ª ISAVFT, BHR Group, Seattle, 2015.
- [5] Forster C, Kohl B y Wiesholzer S, "Metodologías para un modelamiento preciso de riesgo en el contexto de un análisis integrado y cuantitativo de riesgo", 16ª ISAVFT, BHR Group, Seattle, 2015.
- [6] FSV (Sociedad Austríaca para la Investigación en Caminos, Ferrocarriles y Transporte), "Pauta RVS 09.03.11 Metodología del Análisis de Riesgo en Túneles", Viena, 2015.
- [7] Kohl B, Senekowitsch O, Nakahori I, Sakaguchi T, Vardy A.E., "Evaluación de riesgo de estrategias de ventilación de emergencia en caso de incendios durante congestiones de tráfico en túneles unidireccionales con ventilación longitudinal", 17ª ISAVFT, BHR Group, Lyon, 2017.

- [8] Purser DA, "Modelamiento del tiempo para efectos de incapacitación y muerte por peligros tóxicos y físicos en incendios en aviones", AGARD, Bd. 467, págs. 41/1-41/12, 1989
- [9] Kohl B, Wiersma T, Llopis Serrano G, "Aplicación de la Evaluación de Riesgos como Herramienta para la Seguridad en Túneles Viales", Routes/Roads n° 364, 2014.
- [10] Kohl B, "Eficacia de las Medidas de Mitigación de Riesgos en Túneles Viales", Routes/Roads n° 378, 2018.
- [11] Hafner M, Rajšter D, "Análisis Multi-criterio basado en el riesgo y Toma de decisiones para la operación segura en túneles con un ejemplo de Control dinámico del tráfico del túnel", 26° Simposio ISEP, Ljubljana 2018.



VII SIMPOSIO TÚNELES DE CARRETERA

TÚNELES: ACORTAN DISTANCIAS, UNEN PERSONAS
PANORAMA ACTUAL Y BUENAS PRÁCTICAS

La Evaluación de Riesgos como herramienta
en la toma de decisiones para mejorar la
seguridad en los túneles
Bernhard Kohl, ILF Consulting Engineers Austria GmbH

VII SIMPOSIO
DE TÚNELES DE CARRETERA

Promueve:



Organiza:



Colaboran:

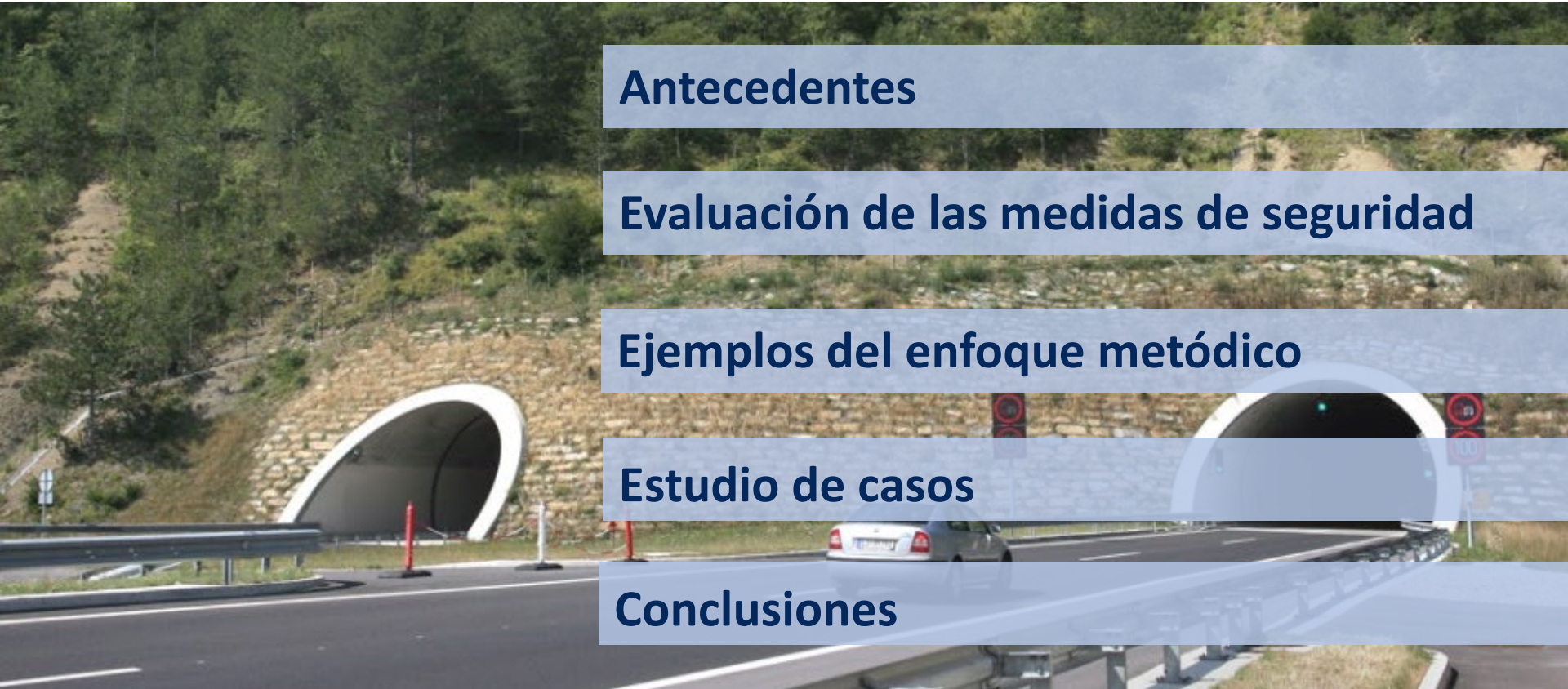


BIM/SA
Barcelona d'Infraestructures Municipals

AMB : Àrea Metropolitana
de Barcelona



Contenido



Antecedentes

Evaluación de las medidas de seguridad

Ejemplos del enfoque metódico

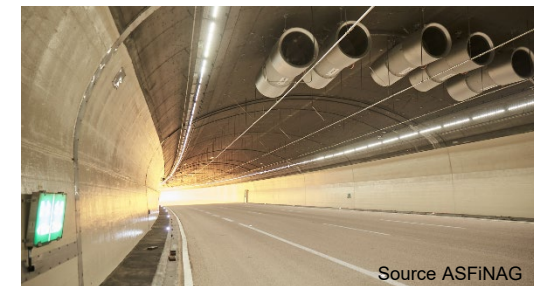
Estudio de casos

Conclusiones

Antecedentes

Enfoque normativo – enfoque tradicional sobre seguridad en los túneles

- Marco de **pautas y reglamentaciones** para el diseño, construcción y operación de túneles viales.
- **Foco en las especificaciones técnicas de diseño** para establecer un cierto nivel de estandarización y garantizar un adecuado rendimiento de los sistemas técnicos.
- ▶▶ El **nivel de seguridad** resultante puede variar de un túnel a otro.
- ▶▶ No tiene en cuenta la eficacia de las medidas de seguridad en un túnel en particular.
- ▶▶ No aborda el **riesgo residual**.



Antecedentes

Los estándares modernos de seguridad toman en cuenta la **evaluación de la eficacia** de las medidas de seguridad.

- ▶▶ **Directiva EC 2004/54/EC**
- **Introduce la evaluación de riesgos** como una herramienta práctica para la evaluación de la seguridad en los túneles.
- Incluye una **lista de medidas de seguridad**, con lo que define un nivel mínimo de seguridad.
- Introduce el **principio de la equivalencia**: se permiten medidas alternativas si ofrecen el mismo o mayor nivel de seguridad.



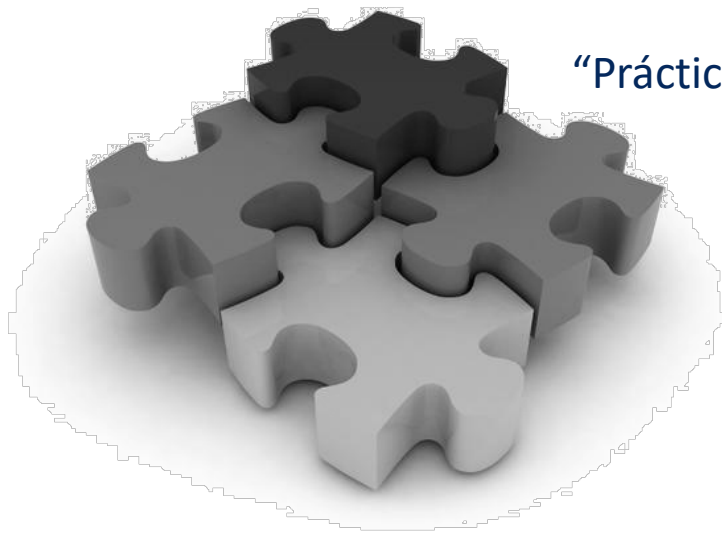
Antecedentes

Enfoque prescriptivo versus enfoque basado en el riesgo

"El enfoque basado en la normativa y el enfoque basado en el riesgo deben utilizarse como elementos complementarios del proceso de evaluación de la seguridad".

(Recomendación, Informe PIARC

"Práctica actual para la evaluación de riesgos en túneles viales")



Antecedentes

¿Porqué necesitamos una toma de decisiones basada en el riesgo?

Puede que se requieran medidas de seguridad alternativas o adicionales por varias razones, por ejemplo:

- Para contrarrestar la influencia de factores específicos que aumentan el riesgo
- Para compensar las deficiencias en la construcción o el equipamiento de los túneles existentes.
- ▶▶ En muchos casos se dispone de varias soluciones alternativas y es necesario encontrar una solución optimizada
- ▶▶ La evaluación de riesgos ayuda a identificar las medidas de seguridad y a evaluar su eficacia (cuantitativamente).

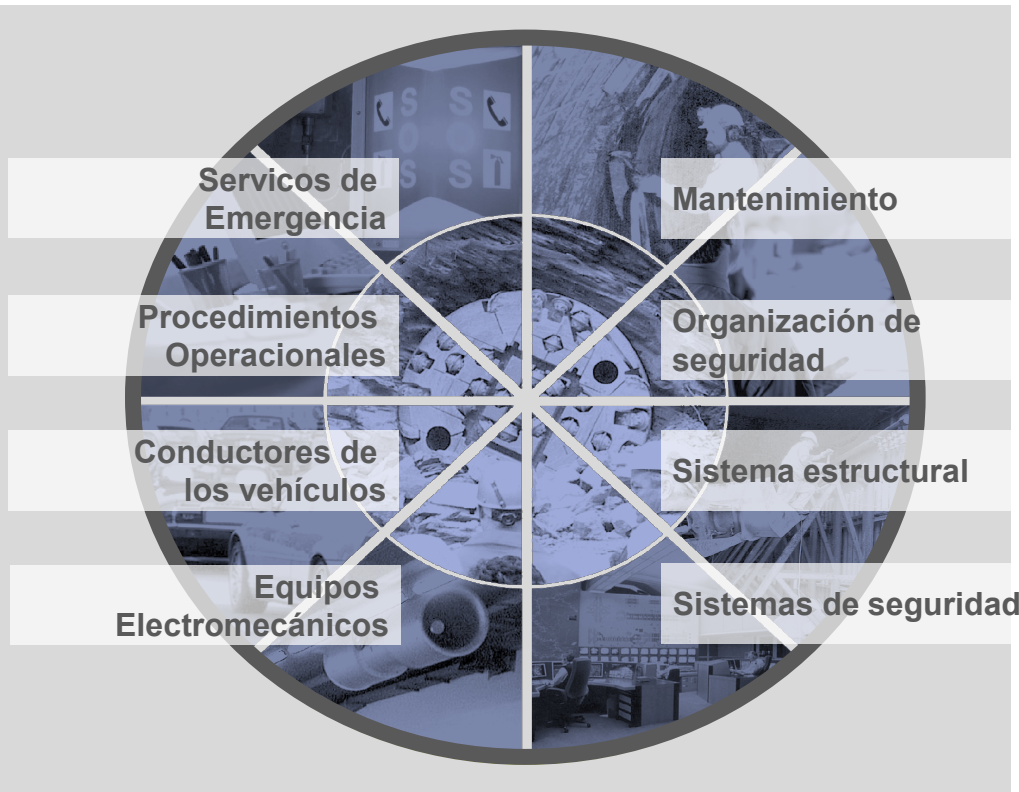
Antecedentes

Aplicación típica de la toma de decisiones basada en el riesgo

- ▶▶ Para decisiones de diseño en la fase de planificación (estructura y equipamiento del túnel).
- ▶▶ Para decisiones sobre medidas adicionales de mitigación de riesgos (en caso de desviación de los requisitos normativos, para compensar características específicas, etc.)
- ▶▶ Para seleccionar la combinación más adecuada de medidas de mitigación de riesgos combinando los resultados de la evaluación de riesgos con el análisis de rentabilidad.
- ▶▶ Para decidir sobre las estrategias operativas para emergencias (funcionamiento de la ventilación, gestión del tráfico, etc.)
- ▶▶ Para decidir sobre los requisitos de seguridad para la mejora de los túneles existentes.
- ▶▶ Para demostrar un nivel de seguridad suficiente.
 - En caso de desviación de los requisitos normativos
 - En la fase de construcción de la mejora de los túneles existentes

Evaluación de las medidas de seguridad

Enfoque holístico

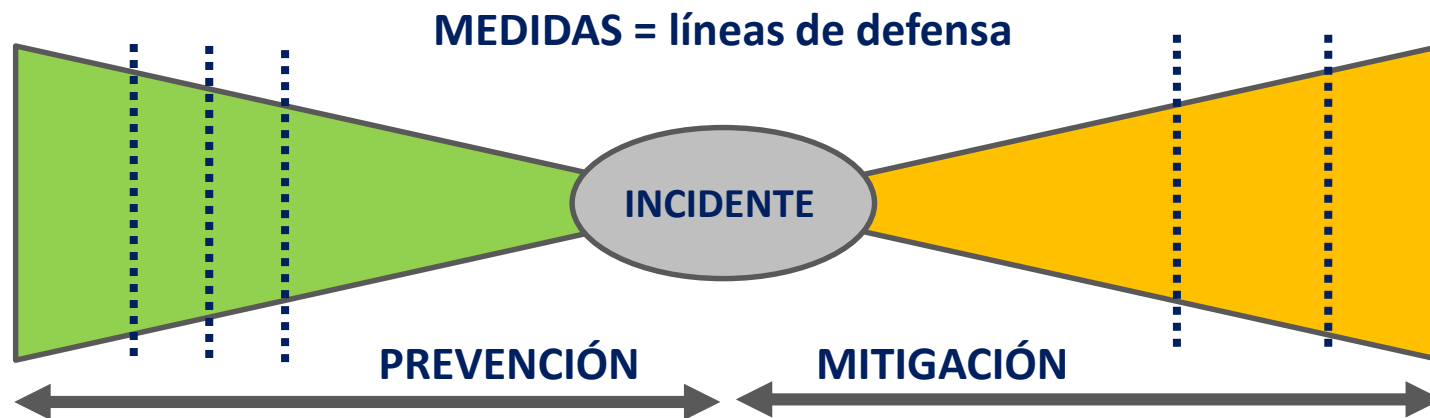


- Un ambiente de túnel seguro requiere de una interacción optimizada y equilibrada de todos los aspectos que influyen en la seguridad.
- **Es necesario integrar medidas de seguridad adicionales en este complejo sistema, teniendo en cuenta los efectos de la interacción.**

Evaluación de las medidas de seguridad

Herramientas para la toma de decisiones basada en el riesgo

- ▶▶ El **modelo de riesgo** debe ser capaz de **cuantificar los efectos** de las medidas de **mitigación de riesgos** en la seguridad de los túneles
- mediante la **modelación de la influencia** de una medida específica en la funcionalidad de un elemento específico de seguridad del túnel
- en cada **punto individual de influencia** en la cadena de eventos



- ▶▶ La **calidad de una herramienta** depende de
- La idoneidad para un problema específico
- La disponibilidad y **calidad de los datos de entrada**

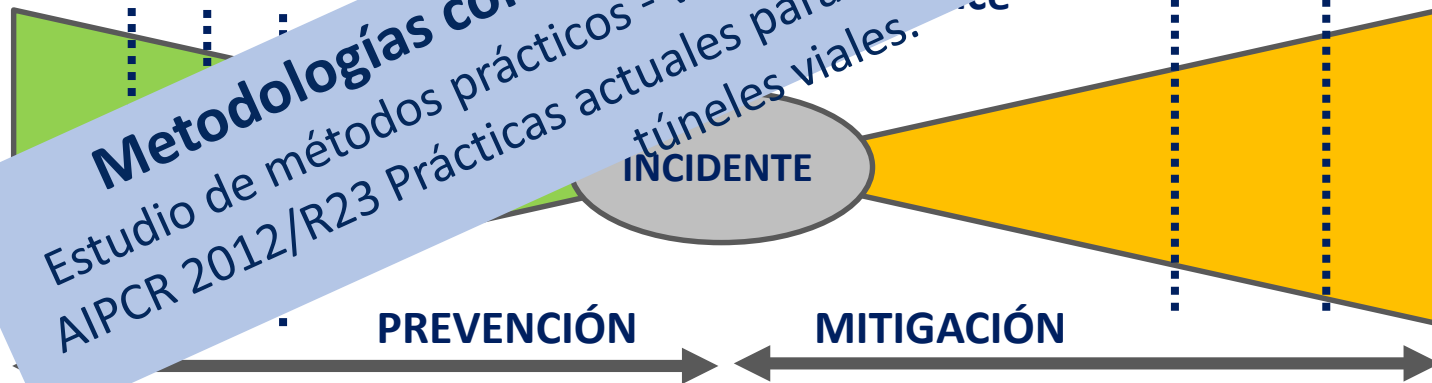
Evaluación de las medidas de seguridad

Herramientas para la toma de decisiones basada en el riesgo

- ▶ El **modelo de riesgo** debe ser capaz de **cuantificar los riesgos** de los elementos de la infraestructura y de las **medidas de mitigación de riesgos** en la seguridad de la infraestructura
- mediante la **modelación de la influencia** de los riesgos en la funcionalidad de un elemento específico
- en cada **punto individual** de la infraestructura y de los eventos

Metodologías comprobadas de análisis de riesgos

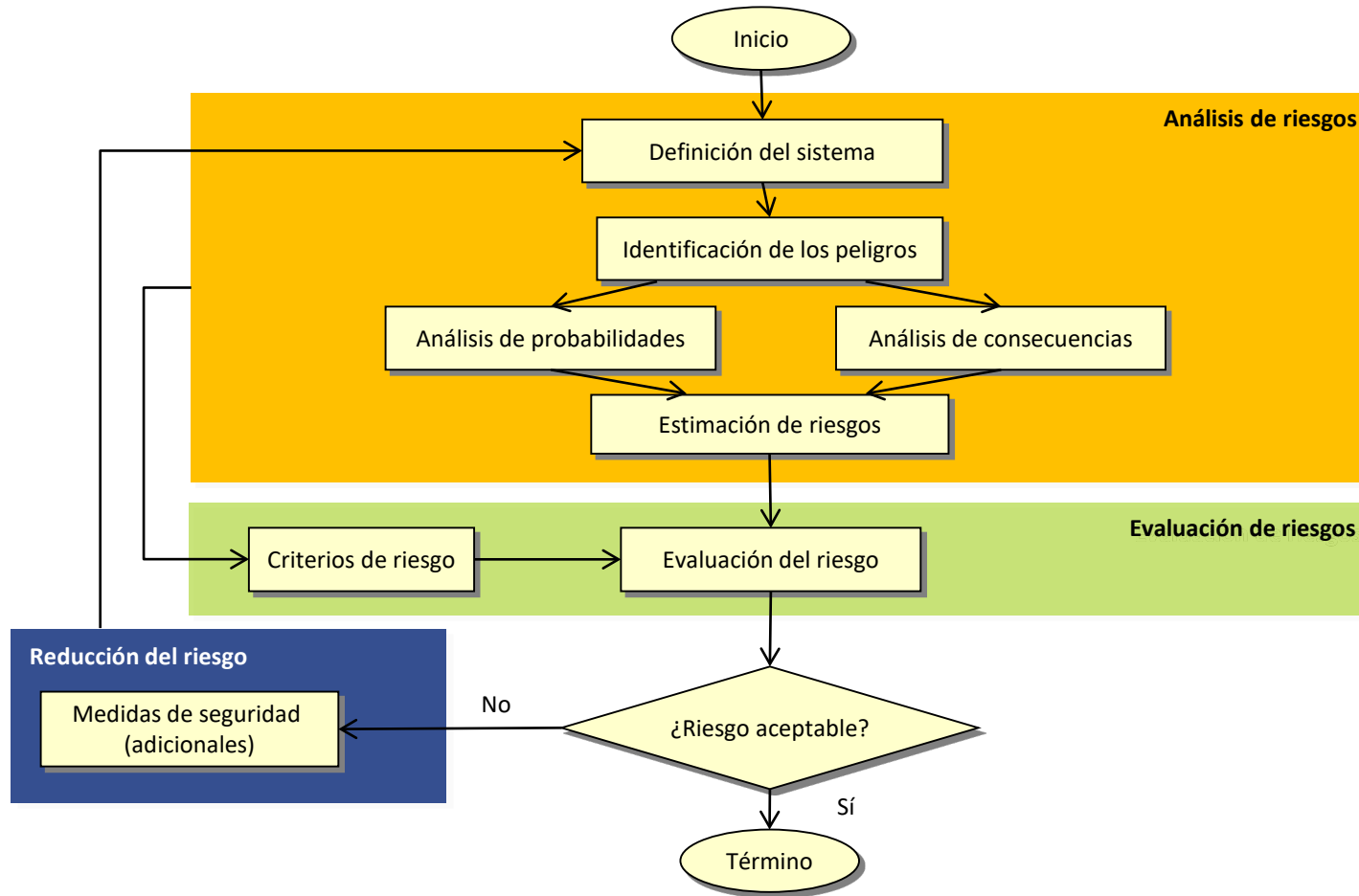
Estudio de métodos prácticos - véase el apéndice A del informe de la AIPCR 2012/R23 Prácticas actuales para la evaluación de riesgos en los túneles viales.



- ▶ La **calidad de una herramienta** depende de
- La idoneidad para un problema específico
- La disponibilidad y **calidad de los datos de entrada**

Evaluación de las medidas de seguridad

Proceso de evaluación de riesgos



Evaluación de las medidas de seguridad

Proceso de evaluación de las medidas de seguridad en los túneles

1. Se deben definir los problemas específicos de seguridad de un túnel individual
2. Es necesario **encontrar medidas adecuadas** que sean capaces de mitigar o compensar los problemas identificados
3. Para el túnel en cuestión, es necesario **analizar cómo actúa la medida sobre el riesgo** causado por los problemas específicos, incluyendo los efectos de interacción
 - ▶▶ Este paso debe ser desarrollado de forma **cualitativa**, pero la cuantificación es altamente beneficiosa
 - ▶▶ La **cuantificación** de los efectos a un nivel detallado puede estar basada en los datos (mediciones, estadísticas), en consideraciones teóricas, en la experiencia práctica o en base a juicios de expertos
 - ▶▶ Para problemas más complejos, como la respuesta a un incidente de incendio, puede ser indispensable el **uso de herramientas complejas de simulación** como la simulación de propagación de humo en CFD o la simulación de salida
4. Después de haber evaluado la eficacia de una medida de mitigación de riesgos a un nivel detallado, se estudia **el efecto de la medida en el nivel de seguridad global** del túnel (por ejemplo, mediante la aplicación de **herramientas profesionales de evaluación de riesgos**).

Evaluación de las medidas de seguridad

Ejemplo práctico: Zona de detención – análisis cualitativo de los efectos



Necesidad de una **evaluación adecuada de todos los efectos positivos y negativos** de la medida de seguridad dentro de un túnel específico, junto con **otros aspectos** como la operación o el costo.

- ▶ efectos positivos (previstos):
 - Un lugar seguro para los vehículos que no puedan continuar
 - Los conductores pueden abandonar su vehículo sin estar expuestos al tráfico
 - El vehículo averiado no impide el tráfico
 - Reducción del riesgo de incidentes posteriores (colisión)
- ▶ Efectos negativos (no deseados):
 - La pared final podría agravar las consecuencias de la colisión, si un vehículo choca contra ella.
 - Por lo tanto, se requieren medidas de mitigación adicionales (por ejemplo, amortiguadores de choque).

Ilustración del enfoque metódico

Ejemplo: Modelo austríaco de riesgo en túneles TuRisMo

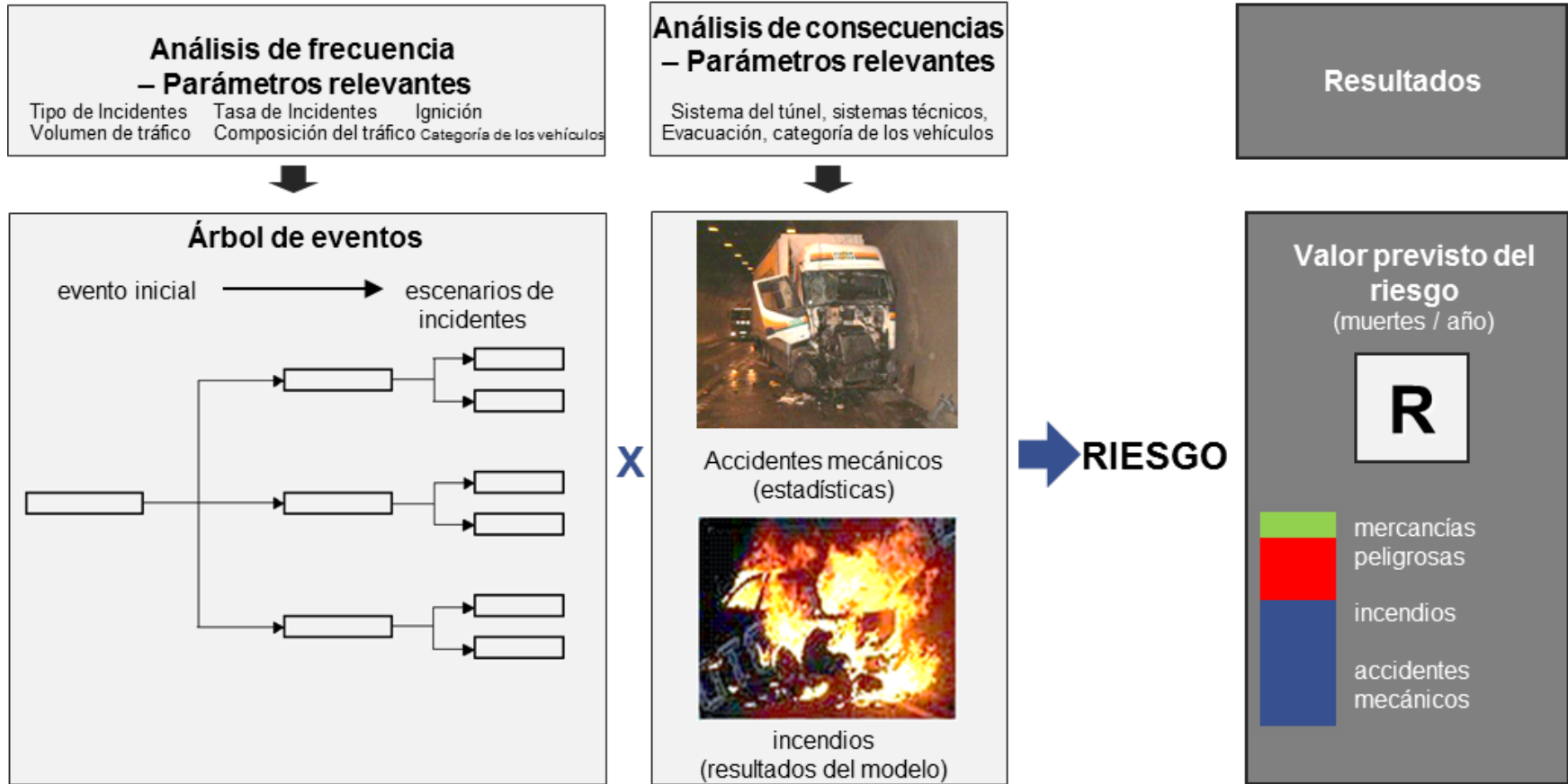


Ilustración del enfoque metódico

Ejemplo: Modelo austríaco de riesgo en túneles TuRisMo

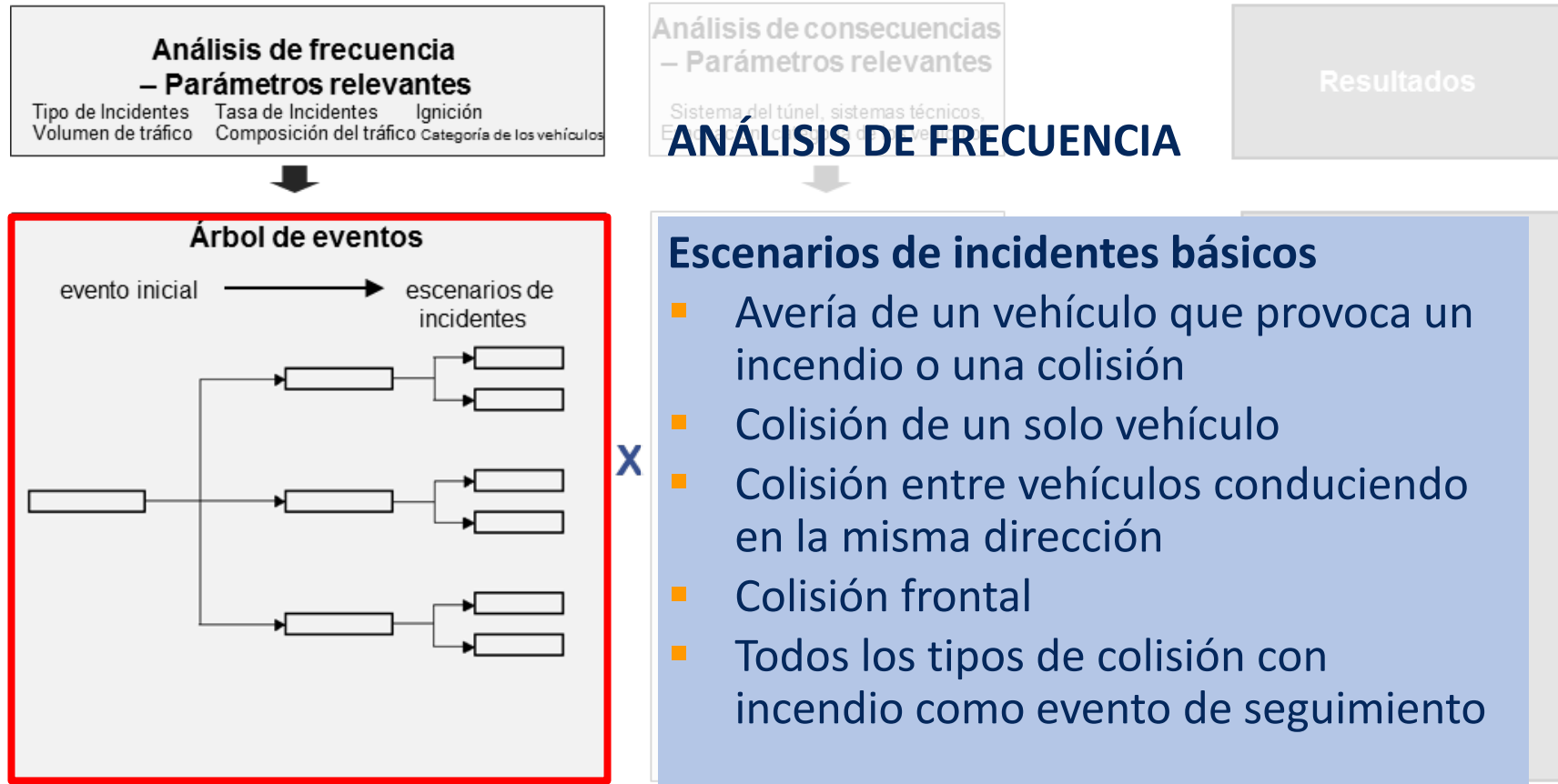
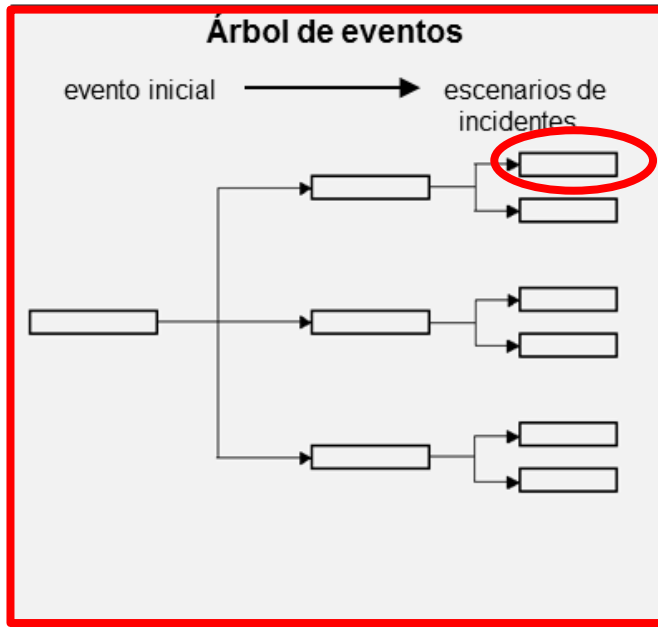


Ilustración del enfoque metódico

Ejemplo: Modelo austríaco de riesgo en túneles TuRisMo



Escenarios de incendio

- Para cada escenario de incendio distinto en el árbol de eventos
- se genera un conjunto de escenarios detallados con parámetros locales variables
- basado en la distribución de probabilidad de los parámetros de influencia

Ilustración del enfoque metódico

TuRisMo – análisis de consecuencias – riesgo de incendio

Para cada uno de estos escenarios de incendio detallados, se realiza una **simulación del flujo de aire transiente en 1D** considerando todos los factores de influencia importantes, tales como:

- movimientos del tráfico
- Ubicación del incendio
- Diseño de la ventilación
- las condiciones meteorológicas límite

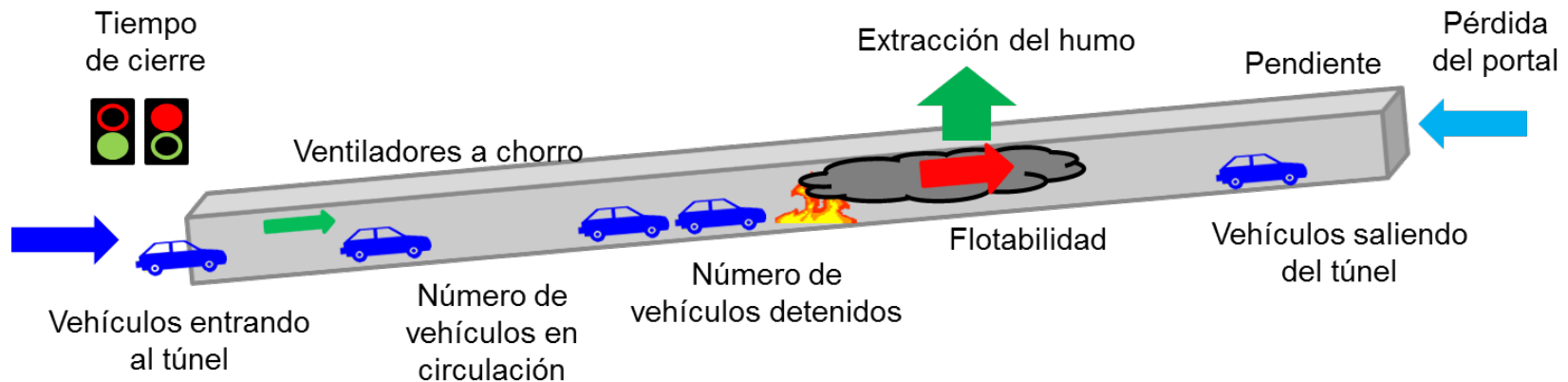


Ilustración del enfoque metódico

TuRisMo – análisis de consecuencias – riesgo de incendio

El desarrollo previsto de las velocidades longitudinales del flujo de aire se utiliza como condición límite en una simulación 3D CFD (FDS) en la que se examinan los efectos locales ("backlayering" o retroceso del humo, estratificación del humo....).

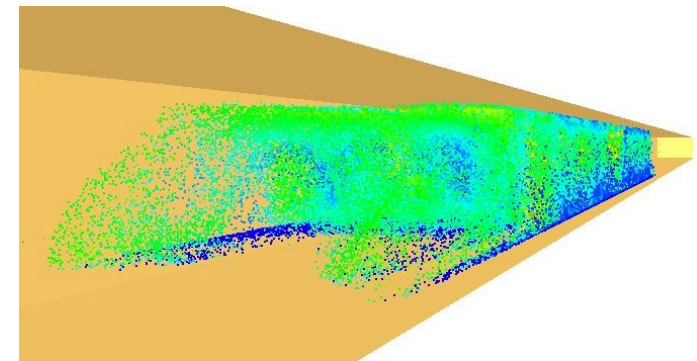
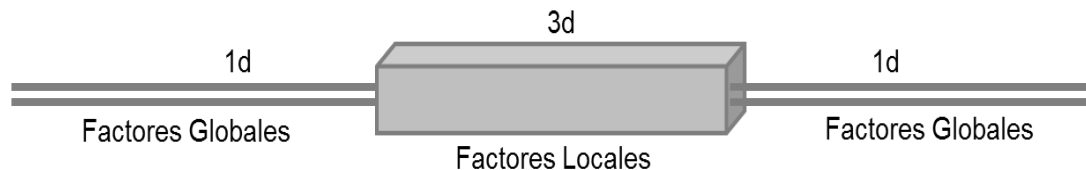


Ilustración del enfoque metódico

TuRisMo – análisis de consecuencias – riesgo de incendio

- Las visibilidad, el calor y las concentraciones de gases tóxicos generadas en las simulaciones 3D CFD se combinan con las distribuciones de la exposición de las personas en función de la configuración del tráfico después del incidente.
- El número total esperado de víctimas mortales se calcula utilizando un **modelo de intoxicación basado en la acumulación** (modelo Purser) que describe los efectos de los peligros de incendio en la velocidad de evacuación y la capacidad de supervivencia de las personas.
- Todo el proceso se repite para el siguiente escenario distinto, cubriendo diferentes tamaños de incendio, diferentes lugares de incendio y diferentes escenarios de tráfico.

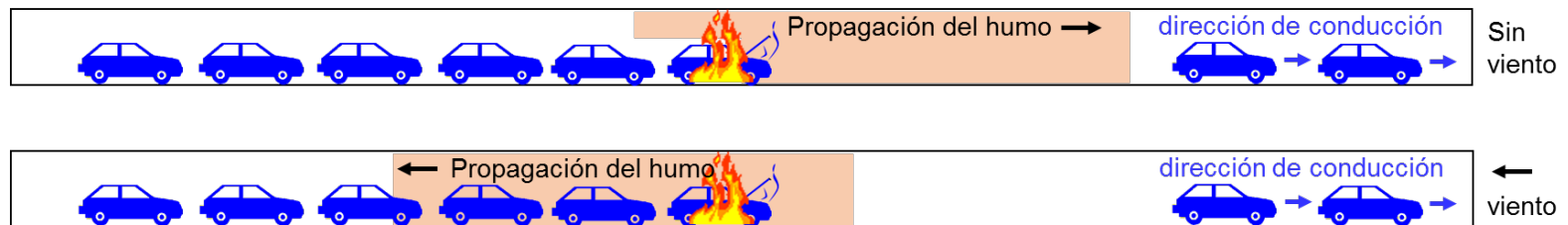


Estudio de casos

Operación de un túnel expuesto a fuertes vientos

Problema

- ▶ Durante condiciones climáticas específicas, el túnel está expuesto a fuertes vientos. El sistema de ventilación ya ha sido actualizado, pero aún no es capaz de gestionar adecuadamente las condiciones del flujo de aire; es posible la propagación del humo en contra del sentido de la marcha.



Objetivos

- ▶ Desarrollo de una herramienta de toma de decisiones basada en el riesgo, que ayude al operador a decidir sobre medidas operativas adicionales en situaciones de viento críticas.

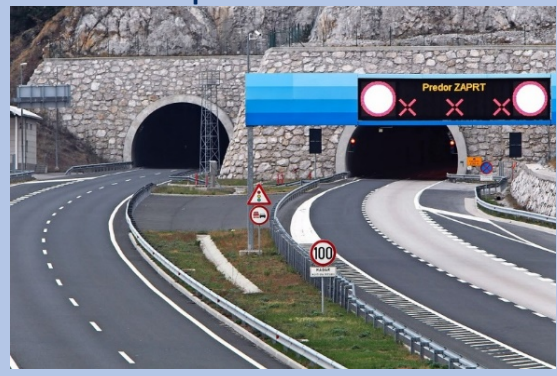
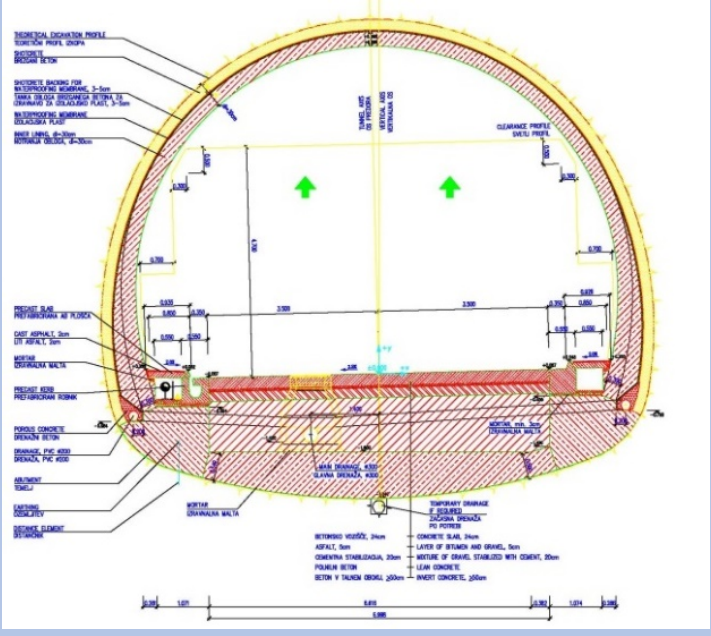
Estudio de casos

Datos generales del túnel

- Túnel unidireccional, 2 tubos de túnel
- Longitud del túnel ~ 2,3 km
- Sección transversal abovedada
- 2 carriles de tráfico por tubo
- Gradiente 2,5%

Aspectos de la seguridad del túnel

- Límite de velocidad 100km/h
- 5 salidas de emergencia (pasajes transversales)
- Semáforos en los portales del túnel
- Ventiladores de chorro ("jet fans") del sistema de ventilación longitudinal en el tubo afectado: 14
- Viento fuerte: los ventiladores de chorro se activan durante la operación normal
- El operador tiene que decidir sobre las medidas operativas



Estudio de casos

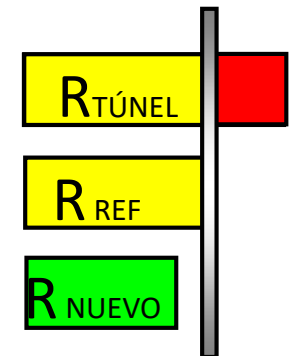
Definición de los criterios de referencia de riesgo – ejemplo

El túnel fue objeto de un estudio de evaluación de riesgos anteriormente.

Resultado: configuración del **túnel**, equipamiento **suficientemente seguro**

- ▶ **Valor de riesgo cuantitativo aceptable** - puede utilizarse como **valor de referencia**
- ▶ Representa el riesgo promedio de un año basado en la AADT; pero el riesgo no es constante en el tiempo.
- ▶ Dado que un determinado nivel de riesgo es aceptable como valor promedio para un año, también sería aceptable un nivel más alto durante un período limitado.
- ▶ Siendo el tráfico el parámetro clave para esta variación, es posible derivar un nivel de riesgo aceptable para un período definido de tráfico más corto.
- ▶ Definir un valor de riesgo de referencia adecuado es fundamental para el proceso; debe discutirse y **acordarse con las entidades responsables**.

Valor referencial de riesgo



Estudio de casos

Implementación práctica del enfoque

- La evaluación debe basarse en una toma de decisiones sencilla y pertinente. Los **parámetros** deben estar disponibles para el operador en tiempo real.
 - Volumen del tráfico (vehículos / hora)
 - Velocidad longitudinal del flujo de aire

		Volumen actual del tráfico en el tubo del túnel [vehículos/h]							
		100	200	300	400	500	504	600	700
Velocidad actual del flujo de aire en el tubo del túnel [m/s]	3,1						0,0028		
	3,0								
	2,5								
	2,0								
	1,5								
	1,0								
	0,5								
	0,0								
	-0,5								
	-1,0								
	-1,5								
	-2,0								
	-2,5								
	-3,0								
	-3,5								
-4,0									
		2.400	4.800	7.200	9.600	12.000	12.105	14.400	16.800
		Volumen de tráfico en el tubo del túnel por día [vehículos/24h]							

Estructura de la matriz de decisiones

Línea gris:
representa la velocidad crítica

Columna gris:
representa el AADT

- ▶▶ Calcular el riesgo de incendio para las combinaciones relevantes de tráfico/flujo de aire aplicando el modelo de riesgo.

Estudio de casos

Matriz de decisiones con el **valor de riesgo referencial en base al AADT**
(representa el riesgo promedio de incendio por hora del túnel)

		Volumen actual del tráfico en el tubo del túnel [vehículos/h]							
		100	200	300	400	500	504	600	700
Velocidad actual del flujo de aire en el tubo del túnel [m/s]	3,1						0,0028		
	3,0				0,0019				
	2,5				0,0022	0,0026			
	2,0				0,0020	0,0027			
	1,5				0,0026	0,0035			
	1,0				0,0034				
	0,5	0,0009	0,0025	0,0047	0,0078	0,0109			
	0,0	0,0014	0,0054	0,0120	0,0182	0,0258			
	-0,5	0,0031	0,0147	0,0404	0,0719	0,0961			
	-1,0		0,0209		0,0816				
	-1,5		0,0283		0,1036				
	-2,0	0,0084	0,0305		0,1167				
	-2,5				0,1148				
	-3,0	0,0078			0,1049				
	-3,5				0,0889				
	-4,0				0,0734				
		2.400	4.800	7.200	9.600	12.000	12.105	14.400	16.800
		Volumen de tráfico en el tubo del túnel por día [vehículos/24h]							

Campos verdes:

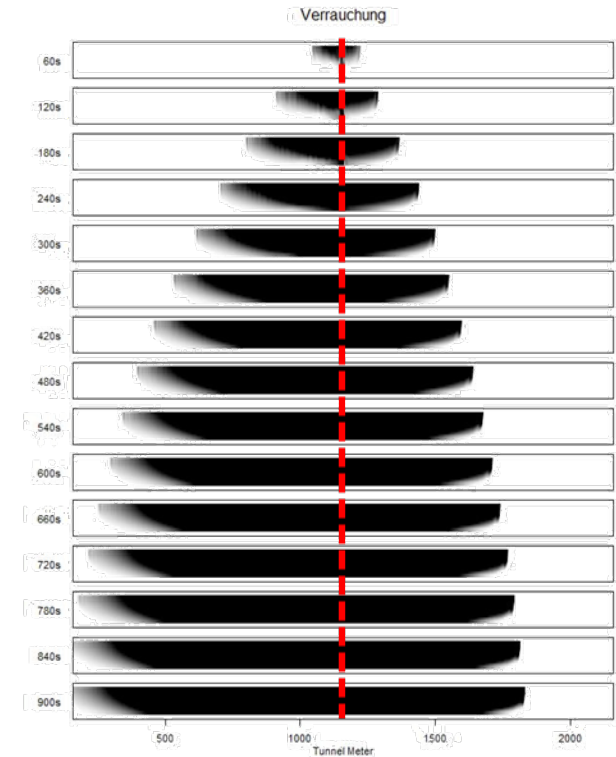
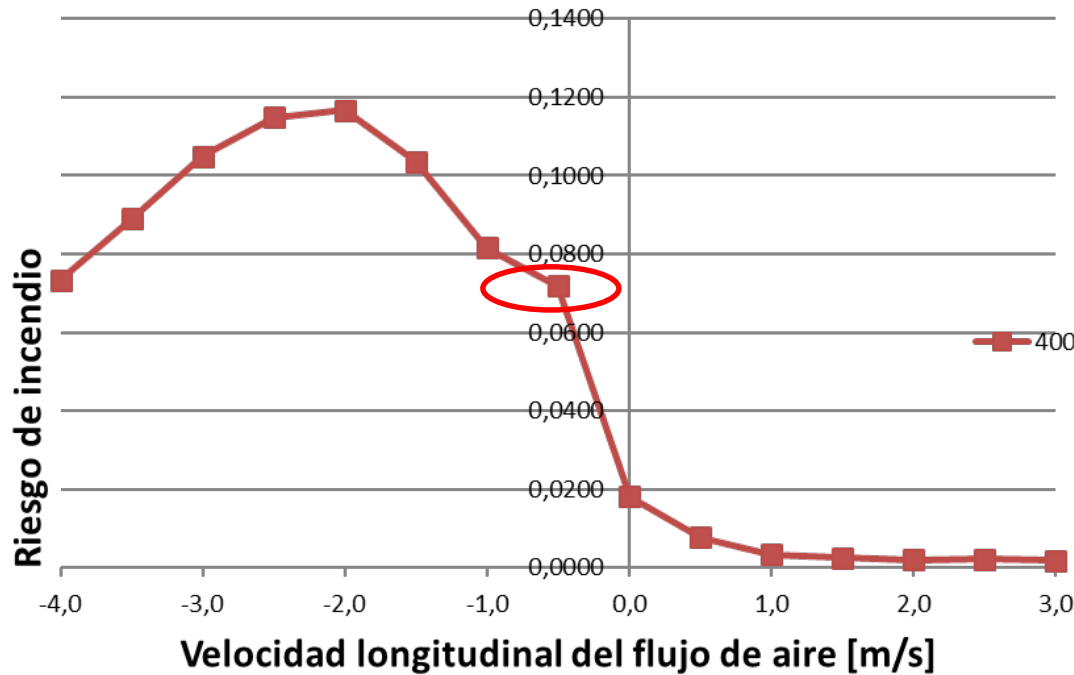
riesgo bajo el valor de referencia

Campos rojos:

el riesgo excede el valor de referencia

Estudio de casos

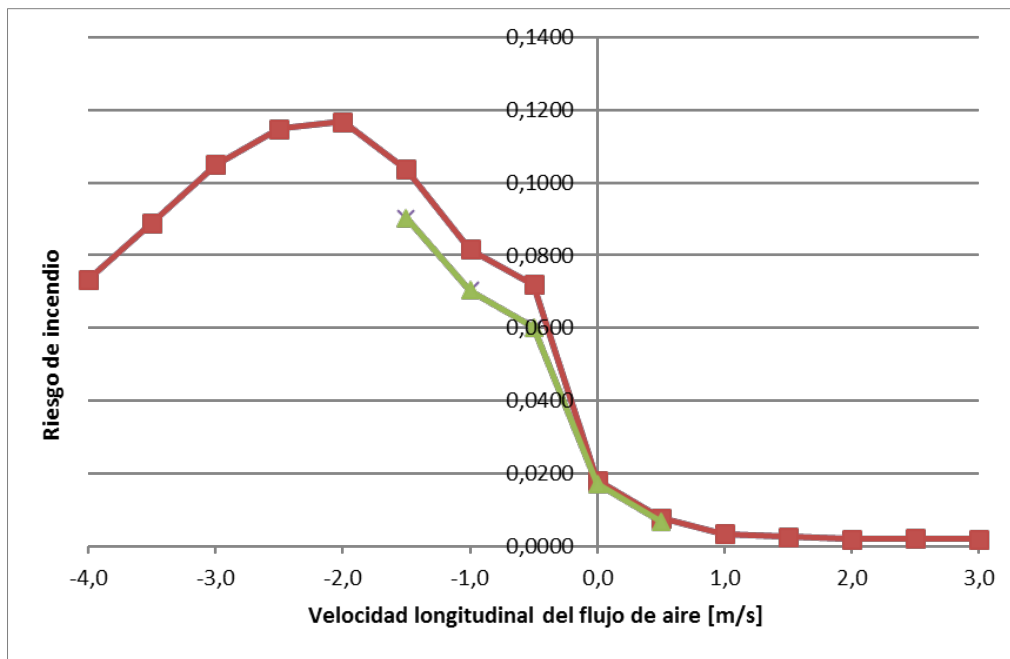
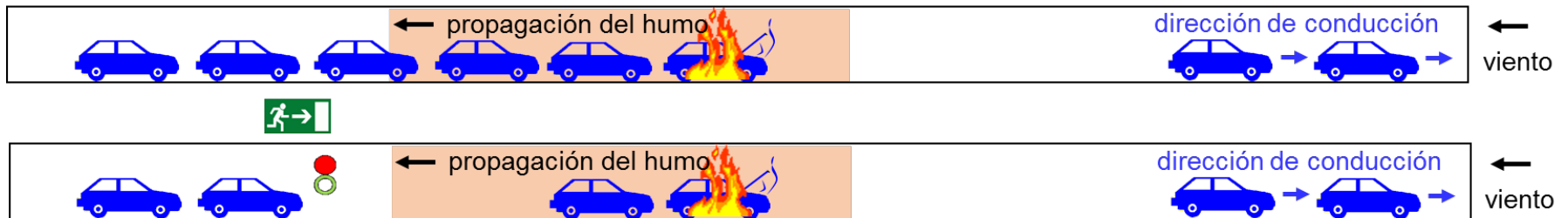
Riesgo de incendio dependiente de la velocidad del flujo de aire para un volume de tráfico de 400 veh/h



Propagación longitudinal del humo para una velocidad del flujo de aire correspondiente de of -0,5m/sec.

Estudio de casos

Investigación de medidas adicionales de seguridad: semáforos adicionales en las salidas de emergencia



Línea roja:

Riesgo de incendio sin medidas

Línea verde:

Riesgo de incendio con medidas

Estudio de casos

Matriz de decisiones con el **valor referencial de riesgo basado en el AADT** (representa el riesgo de incendio promedio por hora del túnel)

		Volumen actual del tráfico en el tubo del túnel [vehículos/h]							
		100	200	300	400	500	504	600	700
Velocidad actual del flujo de aire en el tubo del túnel [m/s]	3,1						0,0028		
	3,0				0,0019				
	2,5				0,0022	0,0026			
	2,0				0,0020	0,0027			
	1,5				0,0026	0,0035			
	1,0				0,0034				
Velocidad actual del flujo de aire en el tubo del túnel [m/s]	0,5	0,0009	0,0025	0,0047	0,0078	0,0109			
	0,0	0,0014	0,0054	0,0120	0,0182	0,0258			
	-0,5	0,0031	0,0147	0,0404	0,0719	0,0961			
	-1,0		0,0209		0,0816				
	-1,5		0,0283		0,1036				
	-2,0	0,0084	0,0305		0,1167				
	-2,5				0,1148				
	-3,0	0,0078			0,1049				
	-3,5				0,0889				
	-4,0				0,0734				
		2.400	4.800	7.200	9.600	12.000	12.105	14.400	16.800
		Volumen de tráfico en el tubo del túnel por día [vehículos/24h]							

Campos verdes:

riesgo bajo el valor de referencia

Campos rojos:

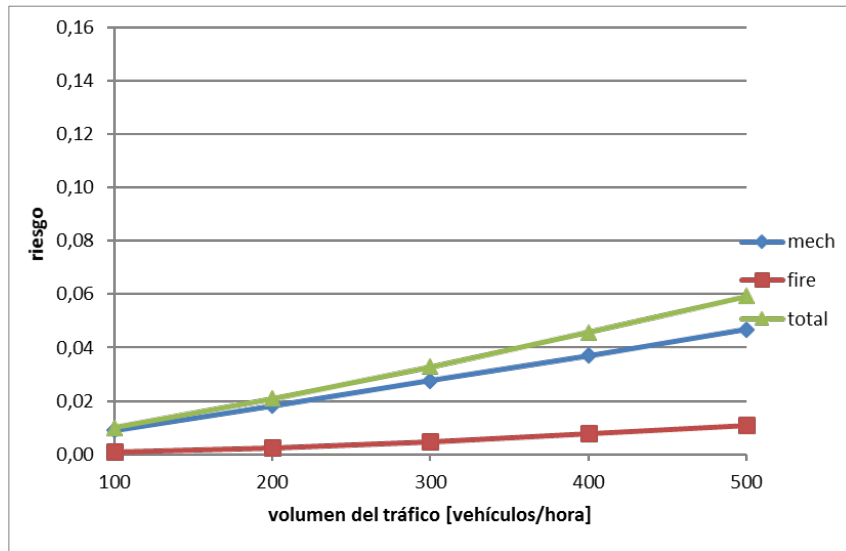
riesgo que excede el valor de referencia

Estudio de casos

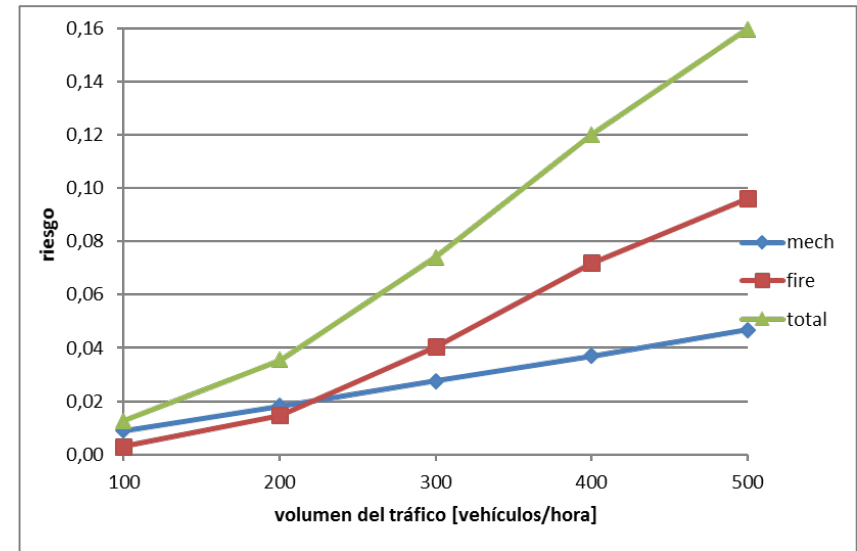
Riesgo de incendio, riesgo de colisiones y riesgos en general

dependiendo del volumen de tráfico para velocidades del flujo de aire de +0,5m/s
| -0,5m/s

+ 0,5m/s



- 0,5m/s



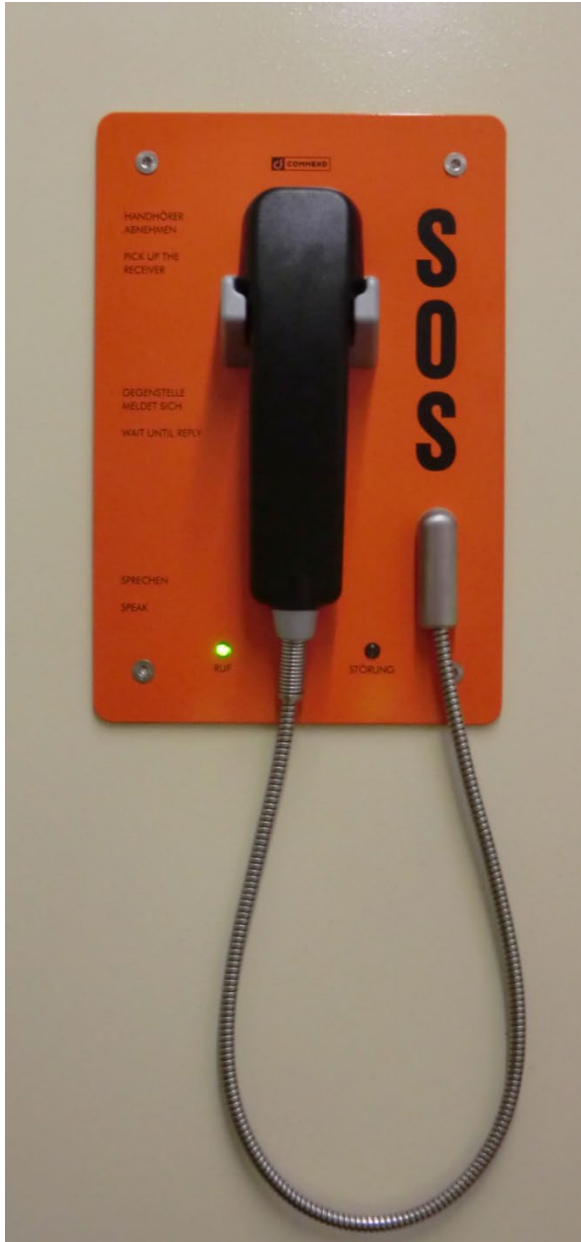
Estudio de casos

Conclusiones

Existe una **creciente necesidad de decisiones informadas** apoyadas por herramientas bien definidas de toma de decisiones basadas en el riesgo, porque...

- En general, el nivel de seguridad de los túneles viales en Europa es elevado
- Las mejoras (adicionales) de la seguridad de los túneles son (muy) costosas y los recursos financieros son limitados.
- En la mayoría de los casos existen diferentes opciones para alcanzar un objetivo de seguridad
- Los modelos de riesgo proporcionan un enfoque bien equilibrado; centrarse en escenarios extremos puede dar lugar a un nivel de seguridad desequilibrado y a un costo desproporcionado.
- Los modelos de riesgo proporcionan una base racional para decisiones complejas

Los **modelos de riesgo avanzados** ofrecen un amplio rango de opciones para nuevas aplicaciones



¡Gracias por su atención!

Contacto: bernhard.kohl@if.com

Para más información visite

www.if.com / www.tunnelriskmodel.at



Tunnel Risk Model



TuRisMo