

# **PROYECTO DE I+D+I PARA EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE RIESGO EN TÚNELES DE CARRETERA**

**Constantino Gago Fernández**

*Jefe de la Sección de I+D+i de Euroestudios*

**Juan Manuel Sanz Sacristán**

*Jefe de la Sección de Instalaciones del Transporte de Euroestudios*

## **Resumen**

Euroestudios ha desarrollado una metodología de análisis de riesgos en el cual se obtiene la peligrosidad de un túnel mediante la estimación del número de accidentes esperados al año y el número de vehículos que se verán implicados en ellos. Además se han obtenido importantes conocimientos sobre la influencia de múltiples parámetros en la seguridad de un túnel de carretera.

## **Introducción**

En abril de 2004 el Parlamento Europeo aprobó la DIRECTIVA 2004/54/CE sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la red transeuropea de carreteras, en la que se cita en reiteradas ocasiones la necesidad de realizar un análisis de riesgos de los túneles en los siguientes supuestos:

- Como verificación de que las medidas alternativas dispuestas en un túnel, en caso de desviaciones respecto a los requisitos mínimos de la norma, garantizan un nivel equivalente de seguridad.
- En caso de que un túnel tenga unas características especiales respecto a los parámetros geométricos de diseño o del entorno donde se encuentre.
- “Al decidir si se permite el transporte de productos peligrosos, basándose en un análisis de los riesgos correspondientes, se tendrá en cuenta si en los

túneles existentes no se pueden cumplir tales requisitos o sólo se pueden cumplir con costes desproporcionados”.

Por tanto parece deducirse que la norma está solicitando un análisis de riesgos para el transporte de mercancías peligrosas (resuelto ya con anterioridad mediante el software QRAM) y otro para la valoración de alternativas en el diseño y equipamiento de túneles y para garantizar la seguridad de los usuarios.

La Directiva indica las siguientes cuestiones particulares respecto al Análisis de Riesgos:

- Un análisis del riesgo de un determinado túnel tiene en cuenta todos los factores de proyecto y todas las condiciones del tráfico que afectan a la seguridad, en particular las características del tráfico, la longitud del túnel, el tipo de tráfico y la geometría del túnel, así como el número previsto de camiones por día.
- Los Estados miembros garantizarán que se emplee a escala nacional una metodología detallada y bien definida, en consonancia con las mejores prácticas disponibles, e informarán a la Comisión de la metodología aplicada; la Comisión pondrá esta información a disposición de los demás Estados miembros en formato electrónico. A más tardar el 30 de abril de 2009, la Comisión publicará un informe sobre la práctica aplicada en los Estados miembros. Cuando resulte necesario, propondrá la adopción de una metodología común armonizada de análisis del riesgo.
- Dicho análisis del riesgo tomará en consideración los posibles accidentes que afecten claramente a la seguridad de los usuarios de los túneles y que puedan ocurrir durante la fase de funcionamiento, así como la naturaleza y magnitud de sus posibles consecuencias.
- Se realizará un análisis del riesgo para decidir si debe o no autorizarse que los camiones efectúen adelantamientos en los túneles que tienen más de un carril en cada dirección.

Por tanto con esta norma ya se disponía de la fecha necesaria para el desarrollo de una metodología de análisis de riesgos en túneles y las cuestiones que debía abarcar y valorar.

En mayo de 2006 el Ministerio de Fomento publica en el BOE el Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado. Mediante esta norma se transpone a la Red de Carreteras del Estado la Directiva Europea antes citada.

En relación con el análisis de riesgos se aplica de manera casi literal lo indicado en la Directiva, con los siguientes matices:

- “La norma regula asimismo la adaptación de los túneles existentes a las condiciones y requisitos mínimos que se establecen con detalle, incluso en aquellos casos en los que puedan autorizarse excepciones debidamente justificadas mediante los pertinentes análisis de riesgo”.
- “El análisis de riesgo de un túnel deberá tener en cuenta todos los factores que afectan a la seguridad, en particular, la geometría del túnel, el entorno, el equipamiento, las características del pavimento y el tráfico y el tiempo de llegada de los servicios de emergencia”.
- “Para todos los análisis de riesgo que puedan realizarse sobre cualquiera de los túneles comprendidos dentro del ámbito de aplicación de este real decreto se seguirá obligatoriamente una metodología detallada y bien definida, en consonancia con las normas de buena práctica disponibles, la cual será objeto de aprobación por la Autoridad Administrativa”.

Por tanto introduce algunos factores adicionales al análisis de riesgos como es el pavimento y que es la Autoridad Administrativa (Secretaría de Estado de Infraestructuras y Planificación del Ministerio de Fomento) quien aprueba la adecuada realización de dichos análisis de riesgos.

## **Lanzamiento del Proyecto**

En el año 2006 Euroestudios verifica que no existe metodología de Análisis de Riesgos para túneles y que en el desarrollo de su trabajo diario necesita realizar diversos análisis de riesgos, por lo que decide lanzar un proyecto de I+D+I.

Siendo conscientes de que cualquier análisis de riesgos debe ser aprobado por el Ministerio de Fomento, se les presenta el proyecto que tiene muy buena acogida por parte de la Subdirección General de Conservación y Explotación que se compromete a facilitarnos el apoyo técnico y de suministro de información que esté a su alcance para el adecuado desarrollo del Proyecto. Además se busca el apoyo, mediante subcontratación para desarrollo de algunas de las partes, de la Cátedra de Estadística de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPM y del Centro Tecnológico de Automoción de Galicia.

El Proyecto ha sido apoyado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio y cofinanciado por el FEDER (Fondo Europeo de Desarrollo Regional).

## **Desarrollo y Fases del Proyecto**

La primera etapa consistió en la recopilación de la información relativa a la configuración y registro de accidentes de los túneles de la red de carreteras del estado y en su parametrización y desarrollo de una base de datos para posibilitar el tratamiento estadístico automático. En sucesivos pasos se contactó con los jefes de explotación para completar la información y mejorar el estudio estadístico.

Simultáneamente se analizaron diferentes metodologías de análisis de riesgos empleadas en diversos campos y países y su posible aplicación al análisis de riesgos de túneles de carreteras, así como posibles métodos estadísticos de modelización del problema.

Se han obtenido diversas fórmulas matemáticas que permiten establecer el número previsible de accidentes y de vehículos implicados, en un determinado periodo de explotación de un túnel, a partir de algunos de los parámetros del mismo.

Como era de prever, para muchos de los parámetros del sistema no se ha podido establecer una relación estadística directa con el nivel de seguridad de un túnel, por lo que se procedió al análisis de algunos de estos con el simulador de conducción del CTAG, así como al desarrollo de diversos focus group con el objeto de establecer un análisis de la posible influencia de los mismos.

Otros parámetros se han incorporado al modelo mediante la propia experiencia de Euroestudios, la opinión de diversos expertos consultados o los resultados obtenidos de diversas simulaciones informáticas.

## **Breve Análisis del QRAM**

Queremos hacer algunas consideraciones sobre el Programa de Análisis de Riesgos QRAM y que, debido a su amplia aceptación y aplicación al transporte de mercancías peligrosas, ha inducido erróneamente a muchos a aplicarlo indiscriminadamente al ámbito de los túneles.

El QRAM es un software de análisis de riesgos, desarrollado por diversas empresas internacionales dentro del entorno de la PIARC, para el transporte de mercancías peligrosas por túneles y, dentro de ese ámbito de aplicación, está plenamente aceptado y validado.

Fuera del propio transporte de mercancías peligrosas no está validado que sea un procedimiento adecuado y actualmente la PIARC ya está indicando que no es de aplicación para el análisis de riesgos de un túnel.

En principio se pueden destacar los siguientes inconvenientes para su aplicación al caso concreto que nos ocupa:

- No analiza la probabilidad, ni las consecuencias de accidente de vehículos que no sean de mercancías peligrosas.
- Los resultados (curva de probabilidad frente a consecuencias) deben ser interpretados en función de curvas de aceptación, que son diferentes en diversos países y que no están aprobadas en España.
- No contempla muchos de los factores de interés involucrados en la seguridad de un túnel o que son necesarios para su diseño, o los contempla con otro fin.
- Penaliza enormemente la seguridad de un túnel frente a circulación a cielo abierto ya que para una mercancía peligrosa considera menor riesgo al exterior (salvo muy alta densidad de población) que un túnel. Este punto está en contraposición directa con la constatación de que el número de accidentes vehículo km en España es mucho menor en túnel que en exterior.

Como ejemplo de caso extremo podemos citar que nos hemos encontrado que al aplicar el QRAM a un determinado caso, el resultado es que sería mejor circular por una carretera bidireccional de alta montaña sin protecciones que en una autovía con un túnel de 500 m, ya que el método acepta múltiples accidentes al año (con uno o dos muertos) y no una baja probabilidad de un accidente con mercancía peligrosa en un túnel en el que se podrían ver envueltos un elevado número de personas (20 – 30 personas). En este caso concreto está ampliamente demostrado que es muchísimo más segura la autovía o autopista que la carretera de alta montaña.

En cambio si se han aprovechado muchas de las formas de analizar las relaciones entre los distintos parámetros o la forma de aplicar la metodología.

## **Modelo Estadístico Desarrollado**

De la información recopilada y procesada informáticamente inicialmente de 409 tubos con 1.994 incidencias registradas de los años 2.006 y 2.007 se pasó, tras las consultas a las diversas empresas de explotación, a 4.005 incidencias entre los años

**V SIMPOSIO DE TÚNELES**  
**SEGURIDAD PARA LOS TÚNELES DEL SIGLO XXI**

2006, 2007 y 2008. El incremento en incidencias se derivó del mayor periodo abarcado y, sobre todo, a la completa información proporcionada por los Responsables de Explotación. Inicialmente se procesaron todas las incidencias (incluidas averías e incidencias menores), mientras que en la segunda etapa se procesaron únicamente las que tenían relación directa en la seguridad del túnel. Se adjunta la ficha desarrollada al respecto:

Figura 1. Ejemplo de incidencia registrada para su tratamiento estadístico

Tras el estudio de diversos modelos se eligió el modelo de regresión binomial negativa para el número de accidentes esperados al año y de regresión de Poisson para el número de vehículos implicados en esos accidentes. Para una mayor precisión se han dividido los túneles en dos zonas estableciendo una ecuación estadística para cada de ellas, lo que es debido principalmente a la configuración habitual de los túneles en España (los túneles bidireccionales suelen tener muy baja circulación de vehículos o, en caso contrario, tienen una longitud muy pequeña). A continuación se recogen las fórmulas obtenidas para cada una de las zonas:

ZONA 1:  $IMD \leq 10.000 \text{ veh/día}$  ó ( $IMD \geq 10.000 \text{ veh/día}$  &  $\text{longitud} \leq 500 \text{ m}$ ).

$$\begin{aligned}\mu_1 = & \exp(-6,384 + 2,446 \cdot 10^{-4} \cdot x_1 + 1,627 \cdot 10^{-3} \cdot x_2 + \\ & + 2,903 \cdot x_3 + 0,1064 \cdot x_4 - 5,212 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2)\end{aligned}$$

ZONA 2:  $IMD \geq 10.000 \text{ veh/día}$  y  $\text{longitud} \geq 500 \text{ m}$ .

$$\mu_2 = \exp(-0,6882 + 4,664 \cdot 10^{-5} \cdot x_1 + 2,496 \cdot 10^{-4} \cdot x_2)$$

AMBAS ZONAS:

$$Veh = \exp(0,736195 - 5,22176 \cdot 10^{-2} \cdot x_5 + 1,48567 \cdot 10^{-5} \cdot x_1)$$

Donde:

$\mu$  : número esperado de accidentes al año

Veh: número esperado de vehículos implicados por accidente

x1: IMD (variable cuantitativa, en veh/día)

x2: Longitud (variable cuantitativa, en metros)

x3: Bidireccional (=1 túnel bidireccional, =0 túnel unidireccional)

x4: Tanto por ciento de vehículos pesados (variable cuantitativa)

x5: Ancho Calzada (variable cuantitativa, en metros)

Se representan gráficamente los resultados obtenidos:

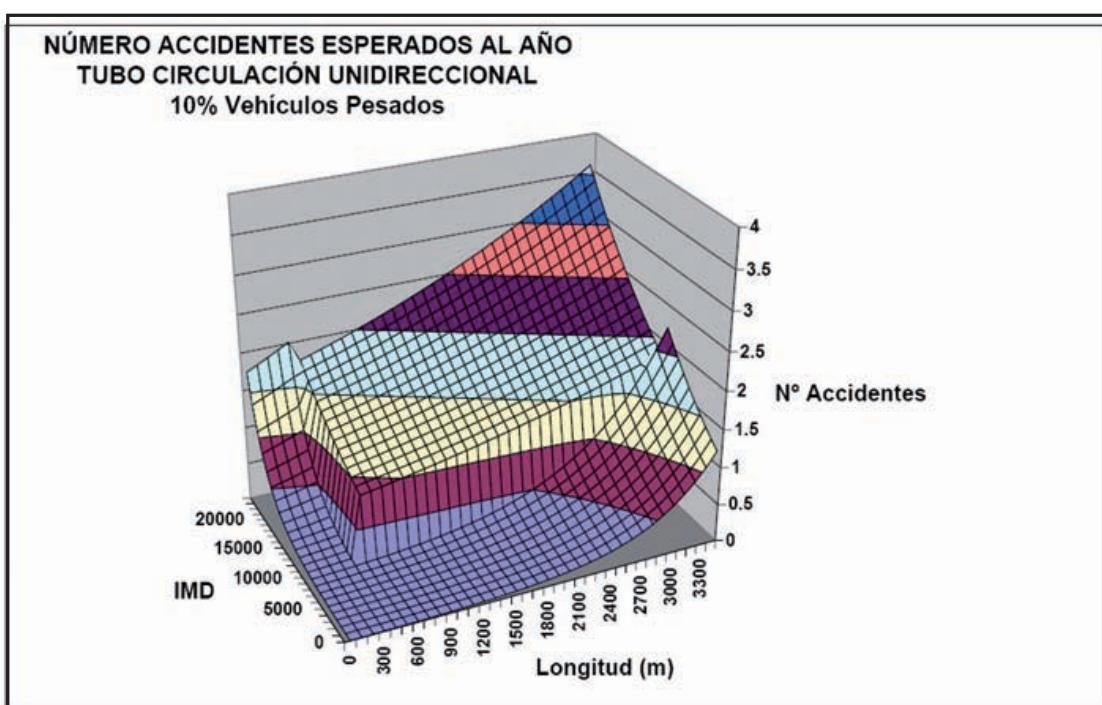


Figura 2. Ejemplo de accidentes previsibles en un túnel

El escalón entre ambas zonas se debe a la diferente accidentabilidad en los túneles muy cortos o de muy baja circulación. Durante el proyecto se han dispuesto varias formulaciones que resuelven adecuadamente la singularidad y establecen una superficie continua, pero se ha preferido mantener en el presente documento dichas diferencias para facilitar la comprensión del desarrollo y resultados.

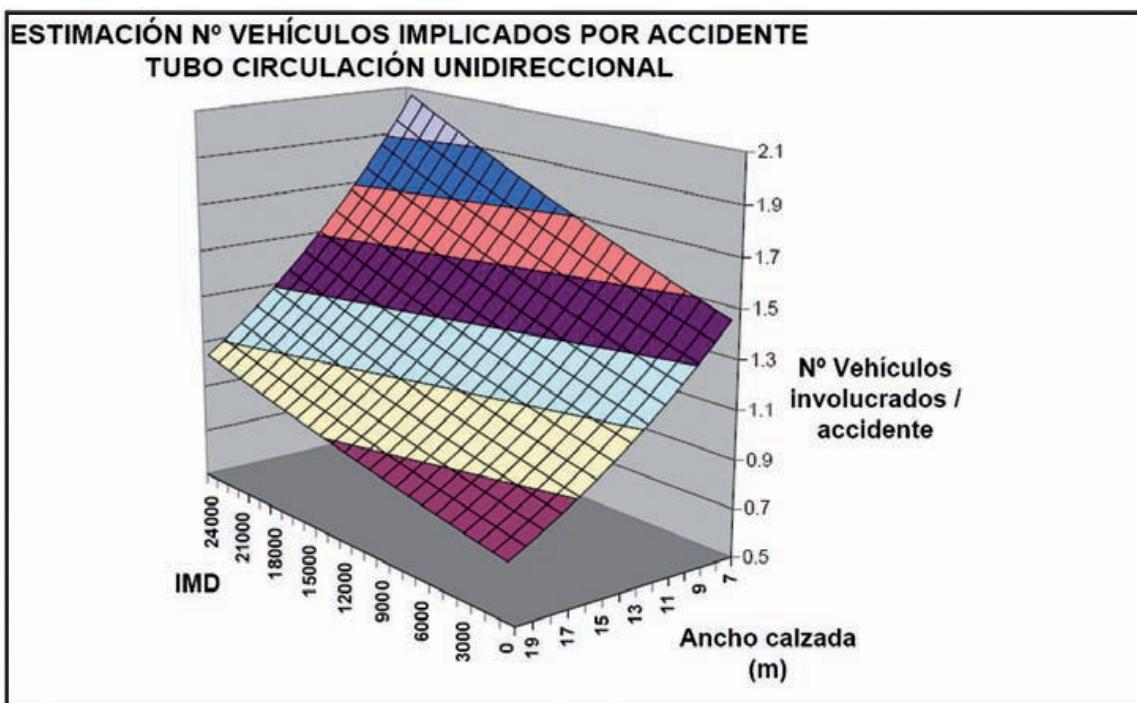


Figura 3. Ejemplo del número de vehículos implicados por accidente

Se ha verificado la precisión de dichas ecuaciones por diversos métodos, como es mediante los propios parámetros de precisión estadísticos o por la aplicación de las fórmulas a determinados túneles incluídos o no en la base de datos.

No se ha localizado ninguna modelización estadística para el número de víctimas en relación con los parámetros geométricos o de explotación, lo cual es normal debido al reducido número de ellas en toda la base de datos de trabajo y en la propia realidad de los túneles.

Otros parámetros analizados estadísticamente y a los que no se les ha localizado ninguna relación matemática con la seguridad de los túneles son los siguientes: pendiente longitudinal media, instalación de paneles de mensaje variable, existencia de sala de control y disposición de apartaderos. Que no se haya localizado esta relación no significa que no sean importantes en la seguridad sino que, con la muestra tomada, no se obtiene una relación directa, su contribución es menor que el del resto de variables o está apantallada por otros parámetros. Por ejemplo: el número de carriles está (en los túneles de la muestra) directamente relacionado con el ancho de la calzada y por tanto la consideración de una anula a la otra.

El rango de validez de las fórmulas viene dado por los túneles e incidentes parametrizados para el estudio, ya que sólo puede contemplar análisis dentro de los rangos de valores de los que se parte. En este sentido destacar que la inmensa mayoría de los túneles tienen un equipamiento adecuado (pero no están conforme al RD) con pendientes normales (máximo 5 %), longitud entre 20 y 5200 m (solamente Somport con 8600 m supera ese rango), anchos de carriles de 3,5 m, etc. y que los accidentes se circunscriben a los años (2006 – 2008).

Según se vaya teniendo una base de datos mayor de túneles y con un registro mayor de accidentes se podrán ajustar las relaciones encontradas y localizar otras nuevas.

### Parámetros Analizados Mediante Simulador de Conducción

Después de verificar que el Simulador de Conducción del CTAG es un elemento válido para el análisis de diversos factores de circulación y del comportamiento de los conductores se establecieron dos circuitos en los que se analizaban las siguientes variables:

- Longitud.
- Pendiente.
- Sección abovedada – rectangular.
- Anchos de arcenes y de aceras.



Figuras 4 y 5. Simulador de conducción y escenario desarrollado

La longitud del túnel se escogió como parámetro de contraste, ya que al conocer su influencia en la seguridad sirve para verificar la precisión de los resultados obtenidos.

La influencia de estos parámetros en la seguridad del túnel se evalúan a través de diversos parámetros del conductor y de las respuestas producidas: velocidad, freno, movimientos oculares, frecuencia cardíaca, posición respecto al eje de la calzada,... Además se realizan diversas encuestas de evaluación y focus group.

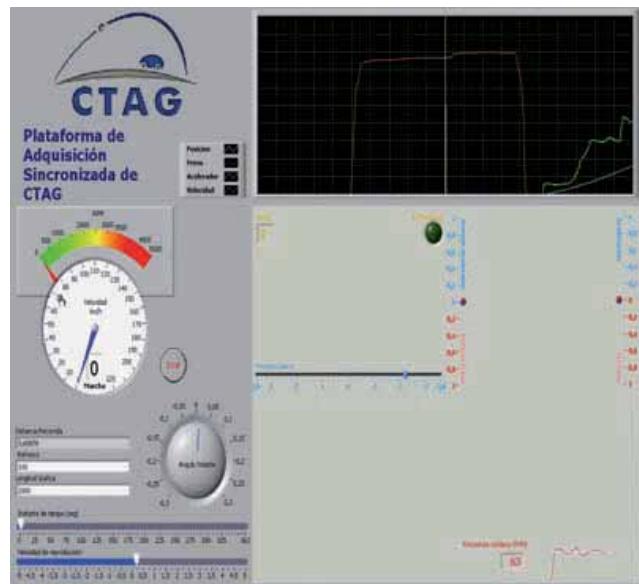


Figura 6. Plataforma de adquisición y análisis de datos

Toda la información obtenida es susceptible de integrarse en el modelo desarrollado. Se verifica la posibilidad de evaluar parámetros que no puedan analizarse de forma estadística o que entrañen elevada peligrosidad.

### Análisis Fluidodinámico de Control de Humos y Simulación de Evacuación

Las consecuencias de un accidente se han analizado (además de por el número de vehículos implicados esperados en cada accidente) por diversas simulaciones del comportamiento de los humos y de la evacuación de los túneles.

La principal dificultad de aplicar a la metodología los resultados obtenidos radica en poder desarrollar un método sencillo que no implique el complejo proceso de modelización y simulación completa del túnel en cuestión.

De forma simplificada el control del humo en caso de incendio se puede reducir a la identificación de la zona libre de humos (por extracción o estratificación) compatible con condiciones adecuadas de evacuación y al tiempo en que estas condiciones se pueden mantener.

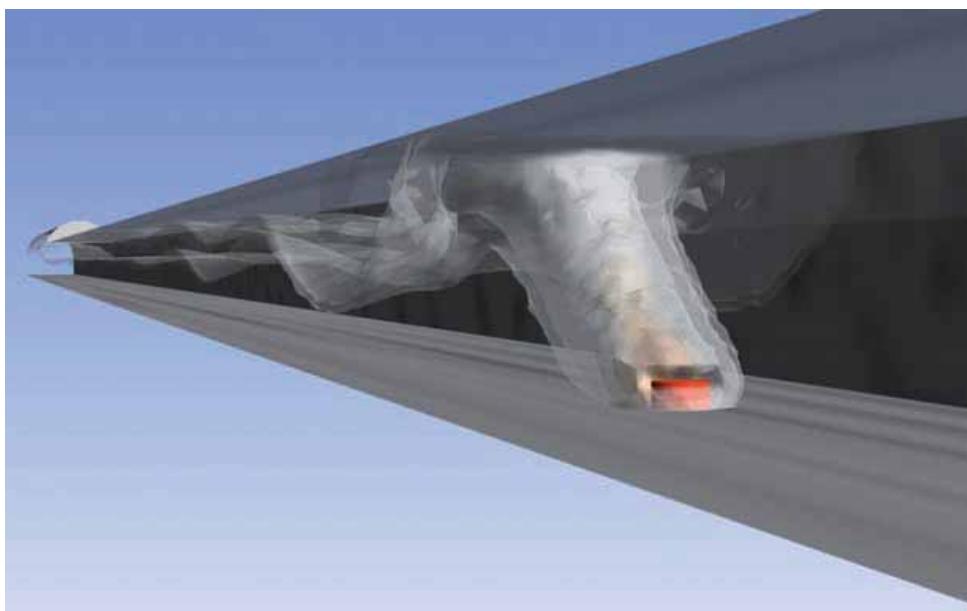


Figura 7. Ejemplo de simulación del control del humo durante un incendio.

Las condiciones de evacuación dependen del número de personas dentro del túnel (que se pueden obtener a partir de la intensidad de circulación, del número medio de ocupantes por vehículo y del tiempo y sistemas para el cierre del túnel), de los tiempos y capacidad de evacuación (que dependerán de los anchos, iluminación y señalización de las vías de evacuación) y de los medios para comunicar a los usuarios la información relativa a la situación del túnel.

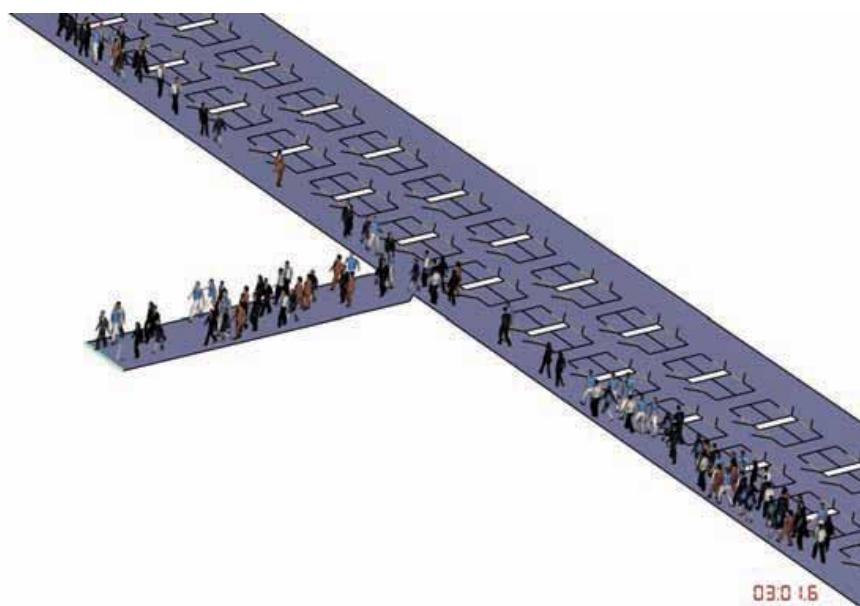


Figura 8. Ejemplo de simulación de evacuación de un túnel.

## Conclusiones y Metodología Desarrollada

Se han localizado fórmulas directas de la influencia de diversos factores en la seguridad de un túnel (a través del número de accidentes esperados y de los vehículos medios implicados en ellos) como es la IMD, la longitud, el carácter unidireccional o bidireccional, el % de vehículos pesados y el ancho de la calzada – número de carriles.

De otros parámetros se ha profundizado en la influencia sobre la seguridad, aunque no se haya localizado una fórmula matemática, bien a través de encuestas, opinión de expertos, simulador de conducción, simulaciones informáticas,...

Se debe seguir mejorando en el registro y análisis de las incidencias con el fin de mejorar los conocimientos en relación con la seguridad de los túneles, poder ajustar las fórmulas obtenidas y localizar nuevas funciones de influencia.

La gran ventaja de tener fórmulas matemáticas se deriva de la objetividad de las mismas. Destacar que la longitud y la IMD tienen una relación directamente exponencial en la seguridad y que no se puede, o no se debe, contemplar por clasificaciones discretas o como si fueran lineales.

Reiterar que, debiendo aprovechar las metodologías y ecuaciones de otros sistemas, se verifica que un túnel tiene sus propias peculiaridades y relaciones con la seguridad. Por tanto, cualquier aplicación de metodologías de otros campos deben realizarse con precaución (como por ejemplo QRAM o estudios de seguridad vial de otros países o a cielo abierto) y solamente mientras no se tenga otra información más fiable.

Como metodología se propone la aplicación de las fórmulas de probabilidad y consecuencias obtenidas para el túnel en estudio. Dichos valores se modificarán en función del resto de parámetros de influencia. Las consecuencias del accidente se obtendrán a partir del número de vehículos implicados, del número de personas que previsiblemente se encontrarán en el túnel y de las condiciones de control de humos y de evacuación. La valoración de las consecuencias se ajustará en función del resto de equipos e instalaciones dispuestos. Los valores resultantes se compararán con los obtenidos para el mismo túnel cumpliendo estrictamente el RD635/2006, verificando si las medidas alternativas o de compensación dispuestas obtienen un nivel de seguridad igual o mayor que el exigido.

**PROYECTO DE I+D+I PARA EL DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA  
DE ANÁLISIS DE RIESGO EN TÚNELES DE CARRETERA**

La metodología alcanzada, que Euroestudios quiere seguir desarrollando en colaboración con todos los organismos y técnicos implicados en el diseño, construcción y explotación de los túneles, es una herramienta útil en la toma de decisiones que impliquen la mejor solución técnica y económica a cada uno de los casos. Además la consideramos una aportación útil a la Metodología de Análisis de Riesgos de Túneles de Carreteras que se debe aplicar a nivel nacional y de la Unión Europea.