



TRANSPORTE DE MERCANCIAS PELIGROSAS

Seguridad operacional y gestión de emergencias

METODOLOGÍA Y NORMAS ISO

Siniestros con
autotransportes de
productos químicos.

TRANSPORTE MARÍTIMO

Tipo de sustancias
peligrosas y contingencias.

NORMATIVA E INSPECCIONES

Vagones cisterna para el
transporte de metanol.

JST Ediciones

Junta de Seguridad en el Transporte

Florida 361, (C1005AAG), CABA

argentina.gob.ar/jst

Tel.: 0800-333-0689

Editorial

El transporte de mercancías peligrosas es una actividad crucial que permite la distribución de productos esenciales en diversos sectores industriales, desde la manufactura hasta la energía. Sin embargo, debido a la naturaleza de las cargas, presenta riesgos significativos para la seguridad de las personas, el medioambiente y las infraestructuras. En esta edición, exploramos las transformaciones y los retos que enfrenta el sector, la gestión de riesgos, el marco normativo y las crecientes demandas de análisis y metodología.

El panorama regulatorio está en constante cambio. Las normativas deben equilibrar la promoción de la innovación con la garantía de la seguridad pública. Las políticas también están evolucionando para fomentar una mayor sostenibilidad en el transporte. Mirando hacia el futuro, es crucial que continuemos fomentando una cultura de seguridad que valore tanto la investigación, la innovación como la precaución. La colaboración entre Gobiernos, industrias e investigación será esencial para enfrentar los desafíos de seguridad operacional.

En esta quinta edición de nuestra revista, presentamos una serie de trabajos que exploran las dinámicas para avanzar hacia un sistema de transporte más confiable y sostenible, alentando el intercambio de conocimientos y experiencias que impulsen la innovación en este campo. Es por ello que destacamos en el dossier el aporte internacional con el trabajo "Evaluación de riesgos del transporte de materiales peligrosos", una revisión de los avances de la investigación en los modos de transporte por carretera y ferroviario; y un estudio sobre el método de análisis de los riesgos de accidentes en los pasos a nivel, que fue aplicado a la red ferroviaria de la región sudeste de Brasil y que tuvo como resultado notable una reducción de accidentes.

También se presentan en el dossier trabajos del modo automotor, ambiental y marítimo que sientan las bases para la gestión de riesgos y emergencias, y el análisis de estrategias efectivas y directrices para la respuesta efectiva ante incidentes. También se examina en el ámbito marítimo un panorama actualizado sobre las regulaciones y normativas en este sector.

Los contenidos de esta edición no solo ofrecen información valiosa, sino que también fomentan el diálogo y la colaboración entre profesionales del sector para construir un marco de referencia que mejore las prácticas y proteja a las comunidades y al medioambiente. En este sentido, la Revista de Seguridad Operacional (RSO) se erige como un pilar fundamental en esta misión, al difundir material técnico-científico que enriquezca el entendimiento y la práctica de la seguridad en el transporte. Al promover el intercambio de ideas y experiencias entre profesionales, buscamos no solo informar y capacitar, sino también inspirar acciones concretas que mejoren la seguridad operacional.



Dr. Julián A. Obaid
Presidente de la Junta de
Seguridad en el Transporte (JST)



RSO

Revista de Seguridad Operacional
Número 5. (ene-jul 2024)
ISSN digital 2953-4739
JST Ediciones – ediciones@jst.gob.ar
<https://www.argentina.gob.ar/jst/jst-ediciones>

Junta de Seguridad en el Transporte
Florida 361, (C1005AAG), CABA
Tel.: 0800-333-0689



RSO es una revista de investigación tecnocientífica, de publicación continua, editada bajo el sello de la Junta de Seguridad en el Transporte (JST). De acceso abierto, compila números de manera semestral. La revista publica investigaciones y estudios que hacen del transporte en cada uno de sus modos un espacio más seguro, moderno y sustentable. Está dirigida a la comunidad de profesionales y actores institucionales, así como a todos aquellos interesados en la teoría y la práctica de analizar y gestionar la seguridad operacional, como contribución al sector, mediante la difusión y el intercambio internacional de riguroso material de investigación.

Cuerpo Editorial

Editora general

Luz Fuster
(Universidad de Buenos Aires)

Editores de sección

Mariana Jacques
(Universidad Nacional de Rosario)

María Laura Ramos Luchetti
(Instituto Superior de Letras Eduardo Mallea)

José María Cohen
(Universidad de Buenos Aires)

Carolina Rodríguez
(Universidad Católica Argentina)

Sebastián Mateo
(Universidad de Buenos Aires)

Equipo técnico editorial

Constanza Farías
(Universidad Siglo XXI)

Christian Natale Antonel
(Universidad Católica de Córdoba)

Diseñadora

Catalina Vera Galvez
(Universidad de Palermo)

Fotografía

Adrián Rodríguez

Comunicación

Fernando Emilio
(Universidad de Buenos Aires)

Director Editorial

Dr. Julián Obaid
(Universidad de Buenos Aires)

Comité Editorial

Maximiliano Zanin
(Universidad Tecnológica Nacional)

Diego Di Siervi
(Universidad Tecnológica Nacional)

Marcelo Restuccia
(Universidad de Buenos Aires)

Daniel Barafani
(Instituto Universitario Aeronáutico)

Francisco López-Valdés
(Universidad de Valladolid)

Comité Asesor

Pablo Cosentino
(Universidad de Buenos Aires)

Daniel Petersen
(Escuela Naval Militar)

Víctor Ferrazzano
(Escuela Nacional de Náutica)

Marcelo Covelli
(Instituto Universitario Naval)

Esteban Maddonni
(Universidad Nacional de La Plata)

Tomás Raspall
(Universidad Nacional de San Martín)

Estefanía Demichelis
(Auckland University of Technology)

Diego Turjanski
(Universidad de Buenos Aires)

Esta revista está bajo licencia 4.0



Atribución. No comercial.
Compartir igual

SUMARIO

DOSSIER

Gestión de riesgos en el autotransporte
carretero

5

DOSSIER - RESEÑA

Mercancías peligrosas en el Centro
Tecnológico del Transporte (CTT)

78

DOSSIER

Transporte de sustancias peligrosas e
impacto ambiental

13

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

Desarrollo de dispositivos de ensayos
ambientales para picosatélites
suborbitales

81

DOSSIER

Evaluación de riesgos del transporte de
materiales peligrosos

19

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Método de análisis de los riesgos de
accidente en los pasos a nivel

87

DOSSIER

Vagones cisterna para transporte de
metanol en vías argentinas y normativa
de seguridad

47

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

La formación de hielo en aeronaves
en tierra

103

DOSSIER

Mercancías peligrosas en el transporte
marítimo: un estado de la cuestión

57

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Accidentología vial. Animales
suelos en rutas y caminos
adyacentes

107

DOSSIER

Gestión de emergencias en el transporte
de mercancías peligrosas por carretera

63

REVISORES DE PARES

Dra. Carolina Sabio Paz

Ing. Pablo M. González

Ing. Alejandro Leonetti

Dra. María Cristina Lozano

Dr. Marcelo Muro

Ing. Roberto Domeq

Dra. Verónica Pérez

Lic. René Reibel

Ing. Ezequiel Ayala

Ing. Franco D'Adamo

Ing. Pablo Martín González

Ing. Carlos Carbonel

Ing. Flavio Damián Atlas

Ing. Mariano Soler

Ing. Alejandro Covello

Ing. Fernando Salvetti

RSO

REVISTA SEGURIDAD OPERACIONAL



PRIMERA REVISTA
sobre transporte multimodal de la
ARGENTINA

Te invitamos
a leer **RSO**



JST | EDICIONES

ediciones@jst.gob.ar

JST | SEGURIDAD EN
EL TRANSPORTE



Secretaría
de Transporte
Ministerio de Economía

DOSSIER

Gestión de riesgos en el autotransporte carretero

Risk management in highway transportation

Diego Folch

Ingeniero industrial,
Universidad católica de Chile.
Miembro de la Comisión
directiva de la Cámara de
Transporte de Mercancías
Peligrosas (CATAMP).
Formación especializada en
buenas prácticas de seguridad
vial en National Transportation
Safety Board (NTSB) y en la
National Safety Council (NSC).

dfolch@catamp.org.ar

Palabras clave: Gestión
de Riesgos, Seguridad
Operacional, Mercancías
Peligrosas, Transporte, Norma
ISO.

Keywords: Risk Management,
Safety, Hazardous Materials,
Transportation, ISO Standard.

Recibido: 07/06/24
Aceptado: 02/7/24

Resumen

Los accidentes de tráfico son la principal causa de muerte de las personas entre 5 a 29 años, y figuran entre las diez primeras causas de muerte en todos los grupos de edad. Naciones Unidas reporta que 1,19 millones de personas fallecen cada año por esta causa, lo que significa que los accidentes de tránsito matan a una persona cada dos minutos y que se producen más de 3200 defunciones al día.

El autotransporte carretero de productos químicos se clasifica como uno de los de mayor potencial de impacto a la salud, los bienes y el medioambiente. La dinámica de un siniestro con productos químicos no tendrá como única consecuencia la propia de la colisión u otro impacto en la vía pública que podría causar muerte, lesiones o daños, sino que sumará el impacto producido por la reacción del producto químico transportado. Es por lo expuesto que este artículo propone una metodología de simples pasos para la gestión del riesgo en el transporte carretero.

Abstract

Traffic accidents are the leading cause of death among people aged 5 to 29 years, and are among the top 10 causes of death in all age groups. The United Nations reports that 1.19 million people die each year from this cause, which means that traffic accidents kill one person every two minutes and that there are more than 3,200 deaths per day.

The road transportation of chemicals is ranked as one of the highest potential impacts on health, property and the environment. The dynamics of an accident involving chemical products will not only result in a collision or other impact on public roads that could cause death, injury or damage, but will also include the impact produced by the reaction of the chemical product being transported. Therefore, this article proposes a simple step-by-step methodology for risk management in road transportation.

Introducción

Los accidentes de tráfico son la principal causa de muerte entre las personas de 5 a 29 años, y figuran entre las 10 primeras causas de muerte en todos los grupos de edad. Naciones Unidas reporta que 1,19 millones de personas fallecen cada año por esta causa, lo que significa que los accidentes de tránsito matan a una persona cada dos minutos y que se producen más de 3200 defunciones al día.

Las organizaciones que ofrecen o demandan transporte carretero tienen una incidencia directa en estos decesos, y el nivel de implicancia dependerá, entre otras cosas, de la naturaleza de las actividades, del tipo de producto transportado, los tipos de servicios, de las condiciones bajo las cuales funcionan, de la competencia de quienes conducen y del personal afectado directa o indirectamente al uso del vehículo en la red vial. Pero es fáctico que, incluso bajo control de todas las variables mencionadas, puede desencadenarse un siniestro vial, por la incidencia de otras variables eventuales no controladas. Ocasionando un impacto a la salud, bienes materiales o medioambiente. Es por lo expuesto que este artículo propone una metodología de simples pasos para la gestión del riesgo en el transporte carretero.

En principio, esta metodología valora un posicionamiento que parte de la gravedad de la contingencia vial, donde el autotransporte carretero de productos químicos se clasifica como uno de los de mayor potencial de impacto a la salud, los bienes y el medioambiente. La dinámica de un suceso con productos químicos no tendrá como única consecuencia la propia de la colisión u otro impacto en la vía pública que podría causar muerte, lesiones o daños, sino que sumará lo producido por la reacción del producto químico transportado.

Luego de fijar la mira en la actividad con más capacidad de dañar al sistema vial, (apuntando en este artículo al transporte de productos químicos), se replica el método propuesto por el estándar ISO 39001:2015. Esta norma internacional especifica los requisitos para un sistema de gestión de la seguridad vial que le permita a una organización reducir las muertes y las lesiones graves relacionadas con los sucesos viales. Para ello, entre otras cosas, la norma exige un coherente y profundo análisis del contexto en el que se le da uso a la red vial, de manera tal que luego se puedan activar medidas de control, contención y mejora. Dicho análisis podrá realizarse desde distintos métodos, pero siguiendo la filosofía presentada por esta norma de seguridad vial, podremos considerar que existen cuatro componentes en los que se agrupan todas las variables presentes en esta compleja actividad, otorgando a las organizaciones una forma de estudio simplificada.

Una vez alcanzada la eficaz comprensión del contexto vial, se activarán las medidas para la gestión de riesgos, priorizando una asignación de recursos que maximice la efectividad en el abordaje.

Aspectos básicos del autotransporte de mercancías peligrosas

La Asamblea General de las Naciones Unidas, respecto del programa Mejoramiento de la seguridad vial en el mundo, observa:

Que la inmensa mayoría de las muertes y lesiones graves causadas por accidentes de tráfico son prevenibles y que, a pesar de algunas mejoras en muchos países, en particular en los países en desarrollo, siguen siendo un importante problema de salud pública y de desarrollo que tiene amplias consecuencias sociales y económicas que, de no encararse, pueden afectar el progreso hacia el logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. (ONU, 2020: 20)

Habiendo expuesto la posición de Naciones Unidas sobre los accidentes de tráfico, pasaremos a profundizar la actividad del transporte carretero de mercancías peligrosas. ¿Qué es una mercancía peligrosa? El Reglamento General para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera (Decreto 779/95, anexo S) las define como aquellas que, siendo imprescindibles para la vida moderna, son consideradas peligrosas por presentar riesgos para la salud de las personas, la seguridad pública o el medioambiente.

¿Qué definimos como riesgo? Según la norma ISO 39001:2015 citada anteriormente, riesgo es efecto de la incertidumbre. Desde esta definición será lógico plantear que, a mayor incertidumbre, mayor será el riesgo. Como se ha presentado en la introducción de este artículo, el transporte carretero de mercancías peligrosas constituye una actividad de alta incertidumbre dada la variedad de productos químicos transportados por carreteras y los riesgos que estos presentan. Podríamos asumir, entonces, que esas mercancías peligrosas pueden agravar las consecuencias de un accidente dado que, a los daños del propio siniestro vial, se le suman los inherentes a la mercancía transportada que, por su propia naturaleza, asocia contingencias mayores y de gran complejidad.

La incertidumbre radica en la potencialidad de causar daño que tiene un determinado elemento. El peligro asociado a una determinada sustancia depende de su composición. Dentro de los principales riesgos que presentan las mercancías y los residuos peligrosos podemos encontrar los asociados a sus propiedades fisicoquímicas, toxicológicas y a los efectos sobre la salud, tal como se describen en la siguiente figura.

Figura 1. Base de la clasificación de las mercancías peligrosas



Fuente: elaboración propia

Modelo ISO 39001:2015 para análisis de contexto

Según la norma ISO 39001:2015, el contexto de la seguridad vial se puede describir mediante las interacciones entre cuatro componentes, tal como se ilustra en la siguiente figura.

Figura 2. Triángulo de la Seguridad Vial, componentes del contexto



Fuente: ISO 9001, 2015

1. El factor ambiental, que en este ámbito de estudio es definido por el sistema de vías públicas en un área determinada.
2. El factor vehicular, que refiere a los vehículos que circulan por la red vial.
3. El factor humano, dadas las personas usuarias del vehículo en la red vial.
4. La respuesta ante emergencias, que constituyen los servicios de atención de trauma y la rehabilitación.

Cada uno de estos componentes está controlado e influenciado en mayor o menor medida por todas las organizaciones e individuos que interactúan en la red vial. El desafío de gestión está en determinar los factores subyacentes sobre los que una organización puede tener control o influencia y que pueden causar o contribuir a la ocurrencia de incidentes y accidentes viales. A continuación, desarrollaremos esos cuatro componentes, interferencias y su forma de gestión.

1. Factor ambiental – Red vial

El sistema de transporte terrestre en Argentina básicamente se estructura en una red federal de carreteras cercana a los 640.000 km, las cuales se encuentran administradas bajo diferentes niveles jurisdiccionales:

- Red vial nacional: de aproximadamente 40.000 km dentro del territorio nacional.
- Red vial provincial: de alrededor de 200.000 km. Se conforma de un sistema secundario que vincula las regiones con la red vial primaria.
- Red de caminos rurales o terciarios: estimada en 400.000 km. Representa un eslabón clave para la salida de la producción primaria hacia los distintos puntos de destino a través de la red primaria y secundaria.

La Agencia Nacional de Seguridad Vial, en su documento Tramos Urbanos de Rutas. TURS (tomo 1, 2023), define para los tramos distintas tipologías:

T1: Travesía Urbana Céntrica.

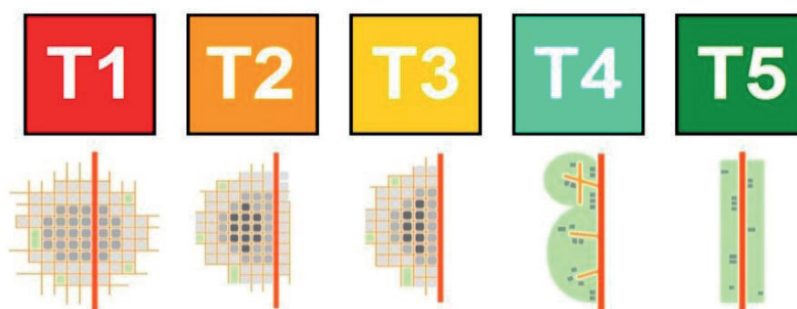
T2: Travesía Urbana No-Céntrica.

T3: Paso Urbano Lateral.

T4: Paso Urbano Difuso.

T5: Paso Difuso.

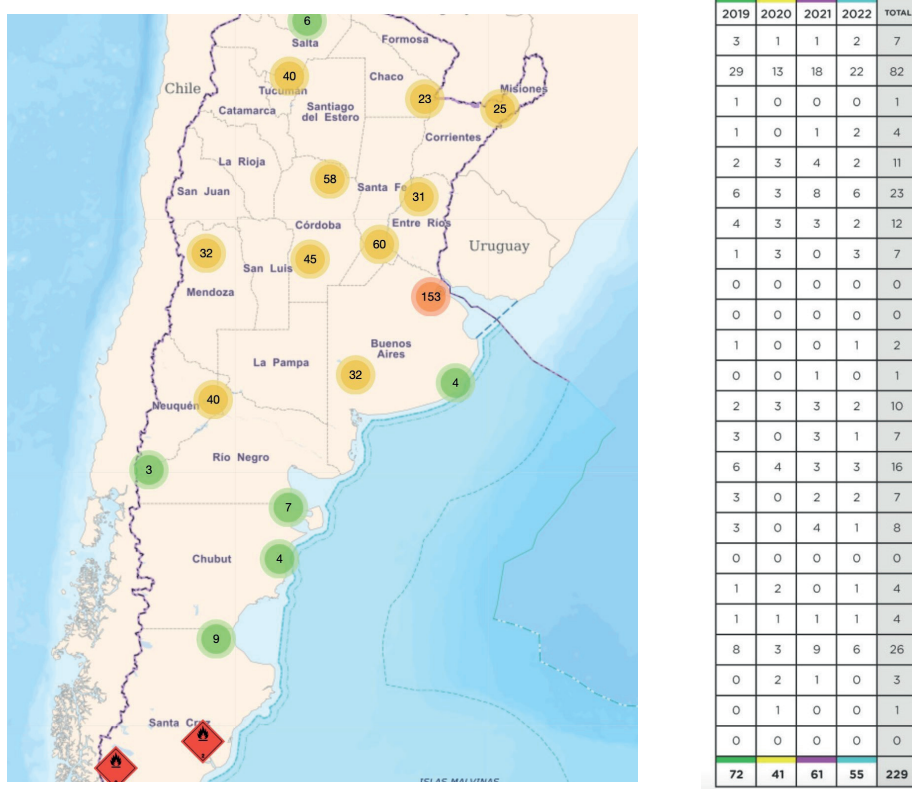
Figura 3. Tipología definida de tramos urbanos



Fuente: ANSV, 2023

La dispersión de siniestros viales registrados sobre la extensión del territorio nacional, informada por el Centro de Información para Emergencias en el Transporte (CIPET), muestra que los accidentes e incidentes viales se presentan de forma directamente proporcional a la densidad poblacional. Este análisis expone la incidencia de las personas usuarias por sobre el estado de la propia red vial.

Figura 4. Mapa de siniestros viales registrados



Fuente: CIPET, 2023

Se puede dar como ejemplo el abastecimiento a granel de hidrocarburos requerido por gasolineras para la venta al menudeo de combustibles, que demanda una circulación de cisternas con hasta 40.000 L de capacidad en zonas urbanas céntricas, donde el potencial impacto se maximiza hasta una complejidad catastrófica. Esta misma situación se genera con el abastecimiento de oxígeno medicinal a hospitales o con el abastecimiento de líquidos criogénicos a industrias, con la complejidad adicional que produce el transporte de este tipo de productos, ya que los gases criogénicos tienen propiedades específicas y se convierten en líquidos bajo distintas condiciones de temperatura y, por más que sean diferentes, todos tienen algo en común: pequeñas cantidades de su líquido pueden expandirse a grandes volúmenes de gas (el cual permanece también extremadamente frío).

2. Factor vehicular

Para comprender la situación en Argentina en relación con el parque automotor, referiremos a la estadística anual de parque activo en condiciones registrales para circular publicado por la Dirección Nacional del Registro del Automotor (DNRPA). Dicha circular informa un parque automotor argentino que llegó a 17.356.861 en diciembre de 2022. Del total registrado, el 3,4 % corresponde a vehículos de flota pesada. Asimismo, la antigüedad de ese segmento indica que un 23,41 % tiene más de veinte años. Dado que los vehículos motorizados que se utilizan en transporte carretero de sustancias peligrosas deben tener una antigüedad máxima de diez años, extensible a trece, se puede afirmar que solo el 27 % del parque está en condiciones de transportar este tipo de productos.

Habiendo ya tomado noción de la composición del parque automotor, abordaremos las capacidades de carga, y para ello expondremos lo especificado por el artículo 27 del Decreto 32/18. Allí se establecen nuevas configuraciones para el transporte automotor de cargas, ampliando los pesos máximos preexistentes para poder transportar hasta 52,5 tn, con el requisito de contar con suspensión neumática en la configuración tractor-semirremolque. Al mismo tiempo, esta legislación otorga un aumento que va de 45 tn a 49,5 tn la carga máxima, con la incorporación de un eje a la unidad tractor, con una relación peso/potencia de 6 CV/kg, es decir, que el camión debe entregar, como mínimo, 297 CV, y la obligatoriedad es que ambos cuenten con sistema de frenos antibloqueo (ABS), luces led, paragolpes antiempotramiento, defensas laterales para peatones y sistema de balanza incorporado en el semirremolque. Otra opción es transportar hasta 52,5 tn con distintas características de tractor-semirremolque, pero con potencias por encima de los 315 CV.

Esta necesidad de contar con equipos nuevos que maximicen la capacidad de carga lleva a las empresas transportistas a enfrentar el complejo desafío de encontrar una rentabilidad que justifique la inversión, que en marzo 2024 alcanza los USD 190.000 para una unidad tractora, simulando la adquisición de camión de marca líder de más de 400 CV, con configuración doble eje suspensión neumática.

3. Factor humano

Sin duda el factor humano es el más complejo de controlar, por la propia naturaleza del ser humano de ser imperfecto. Tomando en cuenta esta naturaleza es que otras actividades de alto riesgo, como la aeronavegación, implementan arduos procesos de reclutamiento y entrenamiento antes de que un piloto llegue a estar a cargo de una aeronave. La realidad muestra que el autotransporte de mercancías peligrosas carece de similitudes con respecto a la aeronavegación, por lo menos en lo referido a horas de experiencia.

Según lo dispuesto por la Ley N.º 17/2005, se entiende por conductor profesional a toda persona provista de la correspondiente autorización administrativa para conducir cuya actividad laboral principal sea la conducción de vehículos a motor dedicados al transporte de mercancías. Para la emisión de una licencia habilitante, los requisitos son:

- Ser mayor de 21 años, contar con documento nacional de identidad, saber leer y escribir en idioma nacional.
- Contar con la licencia de conducir acorde al porte del vehículo.
- No tener antecedentes penales.
- Encontrarse apto en una evaluación psicofísica.
- Realizar curso de formación obligatorio de cinco días de duración para cargas peligrosas (previamente contar con el curso básico de cargas generales).

No existen en el marco legal requisitos relacionados con la experiencia, la competencia o las horas de manejo con productos químicos. Es uno de los principales problemas que enfrentan las empresas que reclutan conductores, las cuales deben desarrollar procesos de reclutamiento y selección que prevengan que un conductor no apto termine al volante de un vehículo de flota pesada. Para que este proceso de selección esté a la altura de la actividad, debe tener intervención directa y profunda de la empresa reclutadora y contemplar aspectos que no son cubiertos por la ley, por ejemplo:

- Experiencia en manipulación de productos químicos.
- Capacidad de adecuación a protocolos técnicos.
- Trastornos de sueño.
- Tolerancia a la presión.
- Conocimiento de vehículos y nuevas tecnologías.
- Conciencia vial respecto al prójimo.

4. Respuesta a la emergencia

Las empresas relacionadas directa o indirectamente con el autotransporte de mercancías peligrosas trabajan (o deberían hacerlo) en prevenir siniestros, ya que nadie desea un choque o una colisión y mucho menos que involucre a su empleado, su camión o su mercadería. Pero eliminar el evento no es factible, por lo que podemos afirmar que en algún momento algo no deseado ocurrirá, y aceptarlo constituye una solución, tanto como tratar de prevenirlo, sobre todo cuando el objetivo es minimizar fatalidades causadas por siniestros viales.

De esta forma, la respuesta a la emergencia será el cuarto factor para analizar. Este factor clave aborda la compleja problemática de conseguir una atención rápida y eficaz de la emergencia. Las medidas consisten fundamentalmente

en la aplicación de primeros auxilios a las víctimas, lo que implicará, entre otras cosas, la disponibilidad y asistencia de profesionales de la salud, la pronta derivación de las víctimas a centros preparados para atender las lesiones existentes, los medios de transporte suficientemente equipados y con personal capacitado, y finalmente, los equipos y máquinas dispuestas para la liberación de la red vial.

En un siniestro con materiales peligrosos, sumaremos la necesidad de identificar adecuadamente el riesgo asociado al producto transportado, así como también las características de las sustancias y materiales: datos que serán de vital importancia para determinar cuál será el protocolo de emergencia que contenga el impacto negativo a la salud y al medioambiente.

Naciones Unidas establece las recomendaciones relativas al transporte de bienes peligrosos en el libro *Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas*, también conocido como "Libro naranja". Se trata de un documento elaborado por un comité de expertos de la ONU, donde se clasifican las mercancías peligrosas según el riesgo que representan, de la siguiente manera:

1. Objetos explosivos: que contienen una o varias materias explosivas y/o materias pirotécnicas.
2. Emanación de gas resultante de presión o de una reacción química.
3. Inflamabilidad de materias líquidas (vapores) y gases o materia líquida susceptible de autocalentamiento.
4. Inflamabilidad de materias sólidas o materias sólidas susceptibles de autocalentamiento.
5. Comburente (favorece el incendio).
6. Toxicidad o peligro de infección.
7. Radiactividad.
8. Corrosividad.
9. Peligro de reacción violenta espontánea.

Los accidentes e incidentes viales pueden darse en toda la extensión del territorio nacional durante las 24 horas y los 365 días del año, lo cual conlleva la obligación (por parte de la empresa transportista y por parte de la productora de esa sustancia) de brindar infraestructura necesaria para el óptimo abordaje de esa potencial contingencia. Esto incluye todo el tramo recorrido para la entrega del producto.

En resumen, la extensión del territorio nacional, el variado nivel de disponibilidad de recursos (nulos en algunas regiones), así como la diversidad de productos químicos presentan un difícil escenario para lograr tratamientos adecuados y evitar aquellos que sean contraproducentes, por lo que será esencial no solo la disponibilidad de información en tiempo y forma a nivel federal, sino también la capacitación y actualización constante del personal y de las autoridades intervinientes. Contener un suceso con productos químicos es una tarea de alta complejidad que no da espacio a improvisación; un error podrá transformar un accidente vial en una catástrofe.

Recomendaciones para minimizar riesgos

En la introducción se mencionó que la capacidad para comprender el contexto vial será directamente proporcional con la eficacia en la gestión riesgos. Dentro de la línea de la lógica de abordaje que se está proponiendo, determinar la capacidad de influir será imprescindible para la asignación de recursos. Muchas veces, organizaciones con sistemas de gestión "inmaduros" copian prácticas de otras organizaciones que resultan a simple vista efectivas, pero pueden representar una trampa autogestionada, al tratarse de actividades que no están dentro del radar de influencia de la organización.

Ejemplificaremos esta situación con el siguiente caso: las rutas nacionales nos presentan "interferencias" en materia de seguridad vial. Algunas compañías interpretan que identificar el estado de las rutas es una cuestión crítica, para lo que desarrollan sofisticados métodos de planificación de rutas considerando factores climatológicos, estado de la calzada, relevamientos de zonas de densidad poblacional, desarrollo de "zonas

calientes" con mayores niveles de siniestralidad según una dispersión geográfica, etc. Esto da como producto final un mapa de riesgo para ser tomado en cuenta por quien conduce antes de iniciar su viaje. Esta práctica puede ser exitosa en organizaciones de determinado tamaño o volumen, pero en una empresa de menor porte, que quiera replicarla con menos recursos, puede resultar contraproducente. Pretender llegar a tener tal nivel de conocimiento de la red vial puede originar preguntas de este tenor: ¿cómo podemos asegurar que algo tan cambiante y dinámico como el estado de una ruta sea relevado de manera efectiva y certera sin los recursos necesarios? ¿Cómo podremos estimar la probabilidad de que quien conduce, al realizar el viaje, encuentre las condiciones que se prevén en la hoja de ruta? ¿Qué tanto podremos esperar que el personal de conducción incorpore efectivamente los riesgos que se mencionan en esa planificación sin una adecuada capacitación?

En definitiva, los recursos que las organizaciones disponen para la gestión de riesgos podrán ser más o menos, pero son finitos y acotados, por lo que la clave para una efectiva gestión será una asignación coherente. Existen varias herramientas para la optimización y también para identificar el grado en que la organización puede influir.

En el siguiente cuadro se mencionan algunas estrategias.

Tabla 1. Preguntas para una adecuada gestión de los recursos

Preguntas	Herramientas
¿Qué interferencias identificamos para cada factor crítico?	Modelo Pearson, Blow Tie
¿Qué tipo de impacto tendrá cada interferencia en los factores de desempeño?	ISO 9001:2015, factores de desempeño
¿Qué grado de influencia se ejerce sobre cada interferencia?	Modelo SIPOC, identificar dueño de proceso. Indicadores de entrada y salida
¿Cómo impacta cada interferencia?	Matriz de riesgo, gravedad/ocurrencia

Fuente: elaboración propia

Habiendo sorteado esta instancia de análisis de grado de influencia para determinar la prioridad de abordaje, podremos acudir a herramientas más convencionales, como matrices de riesgos y oportunidades, para aquellas interferencias consideradas de abordaje crítico y factible.

El enfoque basado en los riesgos del sistema de gestión de la seguridad vial debe estar integrado de manera eficaz. Para eso, se debe tener claridad en el diseño de nuestro sistema y proveer la asignación de los recursos disponibles con el objetivo de lograr un abordaje integral de todos los factores claves.

Bibliografía

Agencia Nacional de Seguridad Vial (2023). Tramos urbanos de rutas. TURs. Análisis de la problemática territorial, del transporte y la seguridad vial. Metodología de identificación, tipificación, siniestralidad y caracterización, Tomo 1. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/12/ansv_estudio_ov_tramos_urbanos_de_rutas_tomo1_2023.pdf

Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes (AFAC) (2022). Informe de flota circulante en Argentina. <https://cdn.motor1.com/pdf-files/afac-flota-circulante-2022.pdf>

IRAM Argentina (2015). Norma IRAM-ISO 39001.

Organización de las Naciones Unidas (2019). Recomendaciones relativas al transporte de Mercancías Peligrosas, Volumen 1. https://unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/unrec/rev21/ST-SG-AC10-1r21s_Vol1_WEB.pdf

Organización de las Naciones Unidas (2020). Mejoramiento de la seguridad vial en el mundo. Resolución aprobada por la Asamblea General. https://contralaviolenciavial.org/uploads/A_RES_74_299_S.pdf

DOSSIER

Transporte de sustancias peligrosas e impacto ambiental: entrevista a Claudio González

Hazardous materials transportation and environmental impact: interview with Claudio González

José Luis Orazi
(entrevistador)

Investigador. Área de Seguridad Ambiental de la Junta de Seguridad en el Transporte

jorazi@jst.gob.ar

Claudio González
(entrevistado)

Dirección de Prevención Ecológica y Sustancias Peligrosas de la Policía de la Provincia de Buenos Aires

Palabras clave: Ambiente, Sustancias Peligrosas, Accidente, Incidente, Seguridad Operacional, Transporte

Keywords: *Environment, Hazardous Substances, Accident, Incident, Operational Safety, Transportation*

Recibido: 19/06/24

Aceptado: 28/06/24

Resumen

Esta entrevista fue planificada por el equipo de investigación del Área de Seguridad Ambiental en el Transporte (ASAT) de la Junta de Seguridad en el Transporte de Argentina (JST). El entrevistado fue Claudio González, perteneciente a la Policía de la Provincia de Buenos Aires, Dirección de Prevención Ecológica y Sustancias Peligrosas. La finalidad de este trabajo es indagar sobre los procedimientos y las particularidades que tienen los incidentes y accidentes que involucran sustancias peligrosas y que conllevan un impacto ambiental negativo.

La Dirección de Prevención Ecológica y Sustancias Peligrosas tiene como una de sus funciones principales la atención de siniestros y actividades de riesgo, así como actuar en situaciones con sustancias peligrosas. Esta entrevista se da en el marco de una política orientada hacia la vinculación entre la JST y otros organismos del sector público y privado con injerencia en la seguridad operacional.

Abstract

This interview was planned by the research team of the Environmental Safety in Transportation Area (ASAT, spanish acronym) of the Junta de Seguridad en el Transporte (JST [Transportation Safety Board of Argentina]). The interviewer is Claudio González, from the Buenos Aires Province Police, Directorate of Ecological Prevention and Hazardous Substances. The purpose of this work is to inquire about the procedures and particularities of accidents and incidents involving hazardous substances that have a negative environmental impact.

One of the main functions of the Directorate of Ecological Prevention and Hazardous Substances is to deal with accidents and risky activities, as well as to act in situations involving hazardous substances. This interview takes place within the framework of a policy aimed at linking the JST with other public and private sector agencies involved in operational safety.

Este trabajo sintetiza la información obtenida como resultado de una entrevista llevada a cabo por el Área de Seguridad Ambiental (ASAT) de la Junta de Seguridad en el Transporte (JST), para discutir el medioambiente y la gestión de la seguridad operacional antes sucesos vinculados con mercancías peligrosas, en el marco de un proceso de acercamiento con distintos actores públicos y privados del ámbito. Claudio González, miembro de la Dirección de Prevención Ecológica y Sustancias Peligrosas de la Policía de la Provincia de Buenos Aires, aporta claves que permiten entender, por un lado, cuál es el rol de la policía ecológica en lo que respecta a la mitigación del riesgo y la prevención de sucesos de transporte con impacto ambiental, mientras que, por otra parte, se describen los protocolos de actuación y la articulación entre los distintos actores del sistema.

Características de una emergencia ambiental

En la Provincia de Buenos Aires, como en otras provincias y ciudades del mundo, ocurren a diario accidentes e incidentes con materiales peligrosos. Estos pueden incluir colisiones o vuelcos de autotanques, fugas en tuberías de transporte y distribución de sustancias peligrosas, derrames en instalaciones industriales, entre otros.

El creciente interés por proteger a la población y al ambiente hace necesario analizar las opciones para mejorar la planificación y el manejo de emergencias. Una emergencia con materiales peligrosos es un suceso inesperado que puede afectar de manera adversa al ambiente y a la población en el área próxima al sitio donde sucede un accidente o incidente con materiales peligrosos. Cuando esto ocurre, se requiere la interacción y cooperación entre diversas autoridades, dependencias y, en su caso, empresas u organizaciones privadas. El manejo de una emergencia puede dividirse en cuatro componentes:

1. Identificación de la naturaleza de la emergencia.
2. Evacuación de la población en riesgo.
3. Aislamiento y confinamiento del incidente.
4. Mitigación de los efectos de la emergencia y descontaminación.

Cuando la respuesta a una emergencia de materiales peligrosos es oportuna y calificada, el incidente puede controlarse antes de que las consecuencias sean mayores. Sin embargo, si el lapso entre el incidente y el inicio de las acciones de respuesta se incrementa, la posibilidad de que las consecuencias sean mayores también aumenta.

Para atender de manera adecuada una emergencia con materiales peligrosos se requiere de una planificación efectiva. Para el desarrollo de uno o más planes de atención se necesita información diversa que incluya los tipos posibles de emergencias, las características del recipiente que contiene el material y, respecto de este último, sus propiedades y las condiciones particulares en que se encuentra. Por otra parte, también es prioritario contar con datos de la distribución de la población y las características del sitio donde ocurrió el incidente, las capacidades materiales y humanas de los organismos responsables de la respuesta y su localización, así como el tiempo requerido para el arribo al sitio del accidente o incidente y el inventario de los recursos disponibles.

Generalmente, quienes responden a emergencias con materiales y residuos peligrosos no tienen una adecuada capacitación para manejarlos, por lo que es importante diferenciar entre quienes atienden al inicio una emergencia y el personal capacitado. El primero en atender un incidente puede no estar capacitado para ingresar al sitio, sin embargo, debe alertar y proteger a la población cercana, así como aislar el área hasta que el personal capacitado llegue e inicie las labores de confinamiento y control.

La importancia de la coordinación

Es importante que todas las instituciones y los organismos involucrados, como los bomberos, la policía, las defensas civiles, los servicios médicos y otros grupos de apoyo colaboren y se comuniquen claramente. La policía realiza las tareas operativas en la respuesta y la policía de seguridad vial colabora en los eventos adversos que se desarrollan sobre carreteras. Es trascendental que los actores primarios que participan en situaciones de emergencia conozcan sus responsabilidades.

- Defensa Civil: coordinación de la respuesta a emergencias, lo que incluye a los bomberos y la policía.

- Policía y bomberos: prevención y acción en situaciones de emergencia, como incendios y rescates.
- Salud pública: atención médica y sanitaria en emergencias.
- Servicios municipales: incluyen tránsito, obras públicas y medioambiente, entre otros, para la rehabilitación de servicios esenciales.

Estos actores trabajan de manera articulada para garantizar la seguridad y el bienestar de la comunidad afectada. Para evitar problemas de coordinación, se utilizan técnicas de manejo de emergencias que han sido acordadas previamente. Por eso es importante que las personas que pertenecen a los organismos se conozcan antes de la intervención. Esto significa que todos sabrán qué hacer y cómo hacerlo antes de que ocurra una emergencia. Además, se establece un comando de incidente que se encarga de coordinar los esfuerzos y asegurar que todos trabajen de manera eficiente.

Al final del día, el objetivo es combinar habilidades y recursos para el beneficio de todos. Esto incluye no solo a los profesionales como policías y bomberos, sino también a voluntarios y otros servicios comunitarios que pueden ofrecer apoyo crucial.

Entrenamiento y niveles de capacitación

La respuesta a emergencias químicas requiere una formación específica y progresiva en diferentes niveles para garantizar una respuesta segura y efectiva. El personal recibe formación para adquirir las competencias necesarias que le permitan valorar riesgos, identificar los procedimientos de actuación más adecuados en función de las sustancias implicadas y utilizar las estrategias ofensivas o defensivas más idóneas. Son 5 niveles que requieren entrenamiento y experiencia:

1. Reconocimiento inicial: algunos lo llaman observador, este es el primer nivel de formación y está orientado a las personas que serán las primeras en llegar al sitio del incidente. La capacitación se centra en proporcionar los conocimientos necesarios para poner en marcha el sistema de respuesta a emergencias. Se puede brindar a cualquier persona que preste atención ante emergencias, así como al personal de las municipalidades y de otros organismos que puedan o no intervenir en sucesos con materiales peligrosos.
2. Operaciones con productos peligrosos: este nivel de formación está orientado a enseñar técnicas para proteger a las personas, al medioambiente y a los bienes. El enfoque está en el rendimiento defensivo y en el confinamiento de productos peligrosos. Aquí se puede incluir a los bomberos, al personal de Defensa Civil e incluso a los servicios médicos.
3. Técnico de productos peligrosos: este nivel de capacitación permite desarrollar actividades para la ejecución de tareas ofensivas y de contención de productos peligrosos. Los contenidos en este nivel son más específicos y requieren muchísimo más entrenamiento. Se utiliza aparatología propia del ámbito y las tareas se vinculan directamente con el lugar del suceso.
4. Especialista en productos peligrosos: este nivel de formación es un entrenamiento ofensivo especializado que aporta conocimientos más directos y particulares sobre productos, medios de transporte y terminales. En este nivel se incluyen los especialistas en transporte que tengan la capacidad de transferir productos o que cuenten con alguna especialización en determinada sustancia como para asesorar de forma profesional en la respuesta.
5. Comandante del incidente: este es el nivel más alto de formación. El comandante del incidente está entrenado para tomar el control de la escena y gestionar la respuesta. La tendencia es prepararse para estar al mando, este es el caso de los responsables de la Defensa Civil, que en la provincia de Buenos Aires son los encargados de coordinar la emergencia.

Responsabilidades específicas de la Policía Ecológica de la Provincia de Buenos Aires

La Policía Ecológica de la Provincia de Buenos Aires, oficialmente conocida como la Dirección de Prevención Ecológica y Sustancias Peligrosas, tiene la misión fundamental de proteger y defender al ecosistema a nivel provincial. Esta unidad, creada el 20 de diciembre de 2005, se dedica a la prevención e intervención directa ante delitos y faltas que atenten contra los recursos naturales. Sus funciones principales son:

- **Protección y defensa del ecosistema:** tarea que realiza a través de acciones destinadas a preservar la biodiversidad y los recursos naturales. De este modo, procura mantener un equilibrio ambiental saludable y sostenible.
- **Prevención e intervención ante delitos y faltas ambientales:** esto incluye la deforestación ilegal, la caza furtiva y la contaminación ambiental, entre otros. Fiscaliza actividades industriales, mineras y de otros sectores que puedan tener un impacto ambiental significativo. Controla exhaustivamente el transporte de materiales peligrosos y residuos para asegurar el cumplimiento de las normativas vigentes.
- **Atención de siniestros y actividades de riesgo:** interviene ante sucesos o actividades que representen riesgos para la población y el ecosistema. Utiliza procedimientos y equipamiento especializado para mitigar estos riesgos. En caso de emergencias con materiales peligrosos, se implementa el Sistema de Comando de Incidentes (SCI), un enfoque estandarizado que optimiza los recursos y facilita la coordinación con distintas autoridades.
- **Actuación en situaciones con sustancias peligrosas:** ya sea por derrames, fugas o manipulación inadecuada. El objetivo es minimizar los impactos ambientales y proteger la salud de las personas mediante una acción rápida y bien coordinada.

Estas funciones son diversas y se estructuran en varios ejes. Así, en el aspecto preventivo, fiscaliza actividades susceptibles de impacto sobre el medioambiente, como las industriales, las mineras, y cualquier otra que pueda tener un alcance significativo. Efectúa controles exhaustivos en el transporte de materiales peligrosos y residuos especiales, según la jurisdicción, asegurando que se cumplan las normativas vigentes. Para ello, colabora estrechamente con las autoridades en los distintos niveles: el Ministerio de Ambiente, la Autoridad del Agua, la Subsecretaría de Minería de la Provincia de Buenos Aires y otros actores a nivel nacional, tales como la Secretaría de Ambiente, la de Energía o el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA).

Desde una perspectiva investigativa, instruye actuaciones en caso de delitos e infracciones ambientales en pos de resolver el problema de seguridad. Colabora con la justicia federal, la provincial y la municipal, así como con otros organismos. En términos operativos, responde a emergencias que involucran materiales peligrosos.

La técnica es otra de sus áreas clave, ya que a través de allí se ocupa de la investigación y recolección de pruebas en delitos ambientales. Asimismo, trabaja en coordinación con laboratorios especializados y diferentes organismos relacionados. En lo que respecta a la capacitación, sostiene una política de formación continua mediante la cual se busca que el personal esté siempre al día con los conocimientos y las habilidades necesarias para identificar, prevenir y responder a emergencias con materiales peligrosos y biológicos. Esto no solo incluye la capacitación de los oficiales, sino también la colaboración con otros organismos y la formación de actores clave como bomberos, guardaparques y personal municipal.

Protocolo de actuación de la Policía Ecológica ante un derrame de materiales peligrosos

Al momento, la Policía Ecológica posee una serie de directrices que solo se limitan a resolver la emergencia desde el punto de vista operativo y que provienen de la norma IRAM 3811 (o la NFPA 704). Se trata de normas técnicas que establecen lineamientos muy generales para la respuesta ante incidentes con materiales peligrosos. A continuación, se aportan algunos de los pasos a seguir ante un suceso de estas características:

1. **Evaluación de la situación:** determinar la naturaleza y el alcance del incidente para identificar los materiales peligrosos involucrados.
2. **Control del área:** asegurar y acordonar la zona para evitar la exposición y el ingreso de personas no autorizadas.
3. **Planificación de la respuesta:** desarrollar un plan de acción basado en la evaluación inicial y los recursos disponibles.
4. **Equipamiento de protección:** seleccionar y utilizar el equipo de protección personal adecuado para el tipo de material peligroso.

Situaciones de emergencia ambiental

En una emergencia, la acción inmediata más importante que toma la Policía Ecológica es establecer cómo se va a proceder mediante el SCI. Este enfoque estandarizado les permite a las organizaciones trabajar juntas de manera efectiva. Se trata de un sistema esencial para garantizar una respuesta rápida y eficiente. Las virtudes del SCI son muchas, pero entre las más importantes destacan las siguientes:

1. Estructura organizacional: el SCI proporciona una estructura organizacional clara que permite una coordinación eficaz entre diferentes entidades y departamentos.
2. Comunicación efectiva: facilita la comunicación entre los diferentes equipos de respuesta, lo que es crucial para una intervención efectiva.
3. Asignación de recursos: permite una asignación eficiente de recursos y personal según las necesidades del incidente.
4. Flexibilidad: el SCI puede adaptarse a incidentes de cualquier tamaño o complejidad.

Situaciones de emergencia ecológica

La intervención en emergencias con sustancias químicas forma parte de un proceso que se realiza en varias etapas. En la primera, los socorristas efectúan una evaluación inicial, establecen zonas de operación y comienzan a tomar medidas para contener la situación. En la segunda, la Policía Ecológica entra en acción. Este equipo especializado tiene la formación y el equipo necesarios para intervenir directamente con la sustancia peligrosa. Su trabajo es esencial para controlar y mitigar el incidente.

La Policía Ecológica puede realizar una serie de tareas, como la identificación de la sustancia, la evaluación de los riesgos asociados, la contención del derrame y la descontaminación del área afectada. También puede trabajar en coordinación con otros equipos para garantizar una respuesta segura y eficaz.

Es importante destacar que la intervención directa con la sustancia es una tarea que requiere una formación especializada y que debe ser llevada a cabo por profesionales capacitados con un equipo específico. Algunos de los elementos de detección que se utilizan son:

1. Oxímetro: este instrumento se utiliza para hallar y medir gases como metano, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono, oxígeno y hasta otros 50 posibles.
2. Explosímetro: es un indicador de gas o vapor inflamable, el cual, al ser portátil, permite captar rápidamente la presencia de gases o vapores combustibles.
3. Fotoionizador: este dispositivo detecta compuestos orgánicos volátiles (COV) y otros gases.
4. pH metro: se utiliza para medir el pH de una sustancia, lo cual es especialmente útil en el caso de derrames de sustancias químicas.
5. Tubo detector: este instrumento permite la detección de gases específicos.

Seguimiento de los protocolos

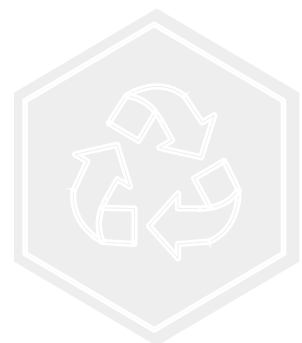
El SCI brinda una estructura sólida y eficaz para la gestión de emergencias. Promueve una respuesta coordinada, eficiente y controlada ante situaciones críticas, y también ofrece diversas ventajas y bondades, entre las cuales se encuentran:

- Organización eficiente: permite una estructura organizativa clara y definida para coordinar y responder a la emergencia de manera efectiva.
- Coordinación: facilita la coordinación entre los diferentes equipos y agencias involucradas en la respuesta a la emergencia.

- **Jerarquía de mando:** establece una clara jerarquía de mando que ayuda a tomar decisiones rápidas y precisas en situaciones de crisis.
- **Comunicación efectiva:** mejora la comunicación tanto interna como externa, evita la duplicación de esfuerzos y garantiza que la información crítica se comparta de manera oportuna.
- **Eficiencia en la respuesta:** permite una gestión más eficiente de los recursos disponibles. Asegura que se asignen adecuadamente según las necesidades prioritarias.
- **Control de la situación:** ayuda a tener un mayor control sobre la emergencia, minimiza el caos y la confusión que pueden surgir en situaciones de crisis.
- **Capacitación y entrenamiento:** fomenta la capacitación y el entrenamiento previo del personal en la utilización de este sistema, lo que mejora la preparación para hacer frente a emergencias.

Conclusiones

- La Dirección de Prevención Ecológica y Sustancias Peligrosas tiene como una de sus funciones principales la atención de siniestros y actividades de riesgo, así como actuar en situaciones con sustancias peligrosas.
- Los sucesos de transporte tienen la posibilidad de causar impactos ambientales significativos en distintos niveles. Por ello, es importante que todas las instituciones y los organismos involucrados colaboren y se comuniquen claramente a partir de un modelo de intervención interdisciplinar.
- La Policía de Seguridad Vial colabora en los eventos adversos que se desarrollan sobre carreteras.
- El personal recibe formación para adquirir las competencias necesarias que le permitan valorar riesgos, identificar los procedimientos de actuación más adecuados en función de las sustancias implicadas y utilizar las estrategias ofensivas o defensivas más idóneas. En adición, existe un Sistema de Comando de Incidentes para abordar los sucesos. Se trata de un enfoque estandarizado que les permite a las organizaciones trabajar juntas de manera efectiva.



DOSSIER

Evaluación de riesgos del transporte de materiales peligrosos: una revisión de los avances de la investigación en los últimos treinta años

Risk assessment of hazardous materials transportation: A review of research progress in the last thirty years

Jian Guo

Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Tecnológica de
Zhejiang, Hangzhou (China)
y Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Jiaotong del
Sudoeste, Chengdu (China)

guoj@vip.163.com

Cheng Luo

Facultad de Ingeniería Civil,
Universidad Tecnológica de
Zhejiang, Hangzhou (China)

luocheng@zjut.edu.cn

Palabras clave: Transporte,
Materiales Peligrosos, Evaluación
de Riesgos, Modos de Transporte,
Modelo de Riesgo.

Keywords: *Transportation,
Hazardous Materials, Risk
Assessment, Transportation
Modes, Risk model.*

Recibido: 14/05/24

Aceptado: 2/06/24

Edición en inglés:

[https://doi.org/10.1016/j.](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.004)

[jtte.2022.01.004](https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.01.004)

Journal of Traffic and Transportation
Engineering, 2022; 9 (4): 571-590
www.keaipublishing.com/jtte

Resumen

En los últimos años, los accidentes de transporte de mercancías peligrosas se producen con frecuencia, causando numerosas víctimas y pérdidas materiales. La evaluación de riesgos de este tipo de transporte ha sido objeto de constante revisión por parte de investigadores y responsables de la toma de decisiones. Este trabajo analiza la literatura existente, desde 1991 hasta 2020, sobre modelos y métodos de evaluación de riesgos en el transporte de sustancias peligrosas, y separa los estudios pertinentes basados en los sistemas de transporte multimodal. Además, se considera un ejemplo para analizar las características de cada modelo de evaluación de riesgos del transporte unimodal, y se propone una novedosa clasificación detallada de los problemas de evaluación de riesgos.

Los resultados indican que la investigación sobre el modelo de evaluación de riesgos del transporte por carretera de materiales peligrosos es exhaustiva, mientras que la basada en el transporte ferroviario y multimodal es deficiente.

Abstract

In recent years, hazardous materials transportation accidents occur frequently, causing huge casualties and property losses. Risk assessment of hazardous materials transportation has been constantly investigated by researchers and decision-makers, in order to study the research progress of risk assessment of hazardous materials transportation, so as to better reveal relevant problems. This review systematically analyzes the existing literature, from 1991 to 2020, on risk assessment models and methods of hazardous materials transportation, and segregates the relevant studies based on unimodal and intermodal transportation systems. Additionally, an example is considered to analyze the characteristics of each risk assessment model of unimodal transportation, and a novel detailed classification is proposed for the risk assessment problems.

The results indicate that the research on the risk assessment model of road transportation of hazardous materials is comprehensive, whereas that based on the railway and intermodal transportations is deficient.

Introducción

Los materiales peligrosos (hazmat) son materiales inflamables, explosivos, venenosos o radiactivos. Durante su transporte, una manipulación incorrecta puede provocar combustión, explosión, fugas y otros accidentes que suponen una grave amenaza para la seguridad material, de las personas y medioambiental. Este es el principal factor que distingue los problemas asociados al transporte de materiales peligrosos de otros problemas de transporte (Erkut y Verter, 1998). La frecuencia de los accidentes relacionados con el transporte de mercancías peligrosas ha aumentado con los años. Según las estadísticas, en China se produjeron 356 accidentes desde enero de 2013 a diciembre de 2017, con el resultado de 855 víctimas mortales, y 2980 heridos y evacuaciones masivas de emergencia (Luo et al., 2019). Esto indica que, en ese período, se produjo una media de aproximadamente 72 accidentes de transporte de materiales peligrosos ocurridos por año. En 2020, numerosos accidentes de transporte de materiales peligrosos se registraron en todo el mundo. El 13 de junio de 2020, un camión cisterna de gas licuado de petróleo (GLP) explotó en Wenling, provincia de Zhejiang (China), causando 20 muertos y 172 hospitalizaciones. En otro incidente, murieron al menos 23 personas y varias más resultaron heridas cuando explotó un petrolero en Lokoja, capital del estado de Kogi, en el centro de Nigeria, el 23 de septiembre de 2020. Un camión cisterna de combustible explotó en una carretera en el estado mexicano de Nayarit el 16 de noviembre de 2020, matando a 13 personas, incluido el conductor del camión cisterna. Al menos 7 personas murieron y 25 resultaron heridas en el accidente de un petrolero en Uttar Pradesh, India, el 16 de diciembre de 2020.

Debido al mayor riesgo de accidentes durante el transporte de materiales peligrosos, se han propuesto varias soluciones en las últimas décadas. Basados en esas investigaciones, Erkut et al. (2007) clasificaron la bibliografía en cuatro grandes categorías, a saber: (a) evaluación de riesgos, (b) encaminamiento, (c) localización de instalaciones y encaminamiento; y (d) diseño de redes. Además, Bianco et al. (2013) señalan que el establecimiento de peajes para desalentar el paso por ciertas zonas es una nueva tendencia que difiere de las cuatro antes mencionadas y puede enumerarse por separado. La mayoría de los estudios literarios existentes se centran en la evaluación de riesgos. Además, la evaluación científica y razonable del riesgo en el proceso de transporte de materiales peligrosos es la base de la investigación sobre selección de ubicaciones, optimización de rutas y diseño de redes (Erkut et al., 2007).

Aunque los materiales peligrosos se transportan principalmente por carretera y ferrocarril, también se utilizan el aire, el agua y las tuberías. Si solo se sigue un modo de transporte en todo el proceso de transporte, se define como transporte unimodal. Si se tienen en cuenta varios modos o se cambia el modo durante el proceso, se denomina transporte intermodal. Como el uso de estos modos varía significativamente, cada uno requiere una evaluación de riesgos y un método de modelización específico (Holeczek, 2019). La mayoría de los estudios existentes se centran principalmente en el transporte unimodal, como la carretera y el ferrocarril. Sin embargo, el transporte intermodal también se utiliza ampliamente en el envío de materiales peligrosos debido a la creciente demanda de transporte en todo el mundo. Por ejemplo, 111 millones de toneladas de materiales peligrosos se transportaron a través del sistema de transporte intermodal en Estados Unidos en 2007 (Erkut et al., 2007). Aunque en China no existe un estudio similar, el transporte intermodal se utiliza mucho allí, como los productos de PetroChina por ferrocarril y el GLP de Sinopec por vía marítima y terrestre. Esto es ventajoso para los transportistas debido a la flexibilidad del transporte por camión a corta distancia. Además, se benefician de las economías de escala del transporte ferroviario o fluvial de larga distancia. Por ello, varios investigadores han estudiado la evaluación de riesgos del transporte intermodal. Sin embargo, estos estudios se centran principalmente en la comparación de ventajas e inconvenientes de los distintos modos de transporte, mientras que la investigación sistemática sobre la modelización del riesgo del proceso del transporte intermodal es insuficiente (Bagheri et al., 2014). Por lo tanto, esta revisión recopila y segrega la literatura relevante desde 1991 hasta 2020 sobre la evaluación del transporte de mercancías peligrosas. También identificamos una nueva clasificación detallada de los problemas de evaluación de riesgos. En relación con las características y la aplicabilidad de varios modelos, los mismos son analizados mediante ejemplos numéricos. Teniendo en cuenta los vacíos existentes en la investigación, esta revisión presenta los retos a los que se enfrenta la evaluación de riesgos del transporte de materiales peligrosos y recomienda futuras líneas de investigación.

El resto de esta reseña se organiza como sigue: la sección 2 ilustra el ámbito de nuestra investigación y esboza los problemas del transporte de materiales peligrosos; la sección 3 clasifica detalladamente la evaluación de riesgos del transporte unimodal y resume los avances de la investigación; la sección 4 presenta nuestro estudio sobre el transporte intermodal; la sección 5 examina un ejemplo numérico para ilustrar las características de los modelos de evaluación de riesgos; la sección 6 presenta los retos de los modelos de evaluación de riesgos existentes; la sección 7 resume las conclusiones del estudio y destaca las futuras direcciones de la investigación.

Ámbito de investigación y visión general de las categorías de problemas

La bibliografía para esta revisión se recopiló mediante el método de búsqueda estructurada propuesto por Webster y Watson (2002). Inicialmente, se seleccionaron las revistas apropiadas en el campo del transporte y análisis de riesgos. Posteriormente, se realizó una búsqueda retrospectiva mediante la cita de la bibliografía pertinente. Siguiendo este planteamiento, se identificaron 272 obras publicadas entre 1991 y 2020. La Fig. 1 ilustra el número de obras seleccionadas publicadas anualmente entre estas fechas e indica que la investigación sobre el transporte de materiales peligrosos alcanzó una nueva etapa en la última década, superando el nivel más alto observado a mediados de los años noventa. El crecimiento de los últimos años puede atribuirse a dos factores, a saber: las principales áreas de investigación del transporte de materiales peligrosos, como la evaluación de riesgos y los problemas de encaminamiento, mantuvieron una contribución estable, y la aparición de ciertos problemas nuevos, como el diseño de redes y la fijación de peajes, reavivó el interés de los investigadores. Sobre la base de los problemas de transporte de mercancías peligrosas clasificados por Erkut et al. (2007), esta revisión divide la bibliografía en cinco categorías, como se muestra en la Fig. 2(a). Como se indica en esta figura, la evaluación de riesgos y los problemas de encaminamiento son las dos ramas importantes de la logística de mercancías peligrosas que más se investigan. La bibliografía seleccionada de ambas representa más del 80 % del total. Además, Erkut et al. (2007) distinguieron aún más las características de los distintos modos de transporte. Aunque esta clasificación esboza los problemas críticos del transporte de mercancías peligrosas, varios artículos abarcan múltiples problemas o implican numerosas áreas. Debido a las diferencias en la evaluación de riesgos para los distintos modos de transporte, clasificamos más 129 trabajos de evaluación de riesgos seleccionados en función de los modos de transporte, como se ilustra en la Fig. 2(b). Aquí, aproximadamente el 80 % de los artículos revisados se centran en el transporte unimodal, entre los que la carretera y el ferrocarril representan la gran mayoría. Por lo tanto, esta revisión analiza los problemas de evaluación de riesgos del transporte por carretera, ferroviario e intermodal.

Figura 1. Número de obras publicadas anualmente entre 1991 y 2020

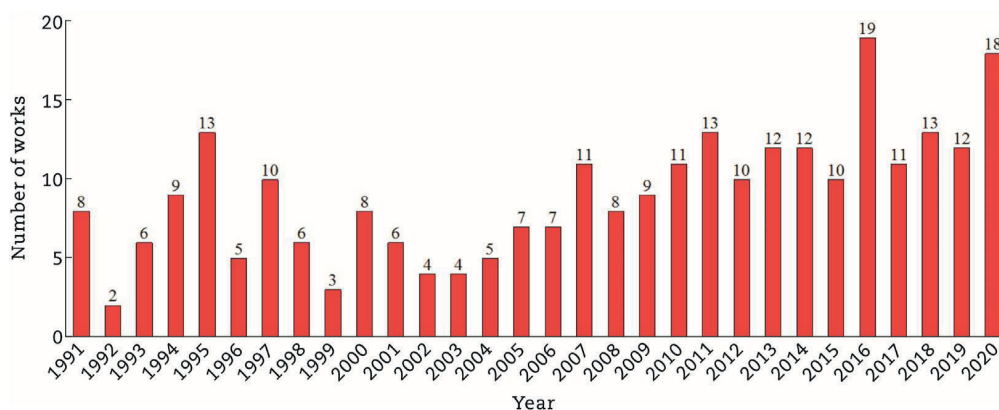
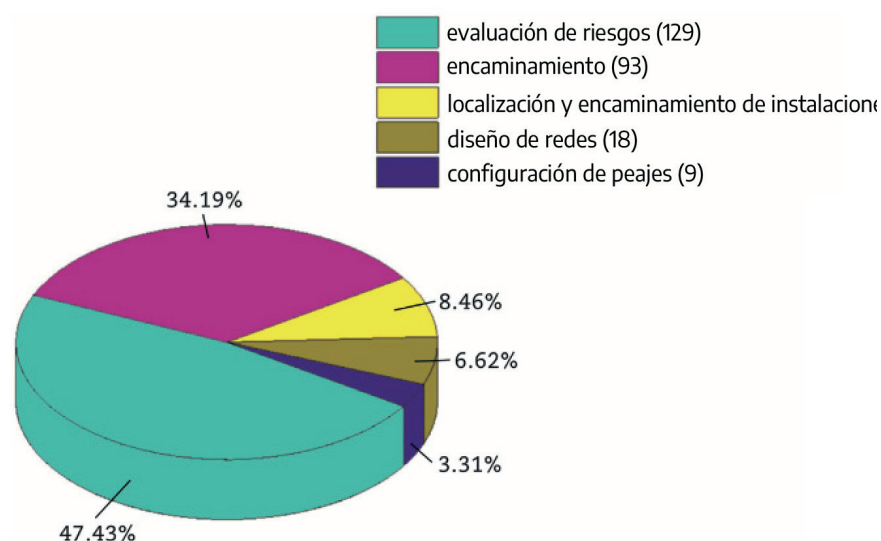
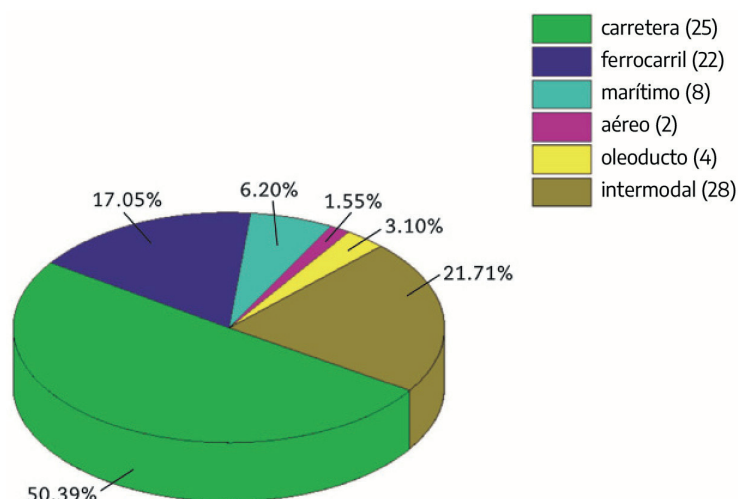


Figura 2. Número de contribuciones basadas en diferentes aspectos



(a) Categoría del problema

Figura 2. Número de contribuciones basadas en diferentes aspectos (cont.)



(b) Modo de transporte

Como las cuestiones de riesgo son la característica más crítica en el transporte de materiales peligrosos, la evaluación de riesgos es la categoría más amplia de los problemas de transporte de materiales peligrosos. Por ejemplo, Erkut et al. (2007) se centraron en el uso del método cuantitativo de evaluación de riesgos para resolver problemas en su revisión. Sin embargo, el aumento gradual del volumen de transporte de materiales peligrosos ha diversificado los métodos de transporte. En consecuencia, la teoría del riesgo se desarrolla constantemente y siguen surgiendo nuevos modelos y métodos de evaluación del riesgo. Por lo tanto, creemos que es necesario un esquema de clasificación más específico para abordar los nuevos problemas emergentes en el transporte de materiales peligrosos. Además, nos centramos en la evaluación de riesgos de los distintos modos de transporte para mejorar la revisión de la bibliografía. Las tablas 1 y 2 resumen la revisión actual de los problemas de evaluación de riesgos en los transportes unimodal e intermodal, respectivamente.

Tabla 1. Clasificación de los problemas de evaluación de riesgos en el transporte intermodal

Clasificación	Referencia
Automotor + Ferroviario	Bagheri et al. (2014), Brown y Dunn (2007), Bubbico et al. (2000, 2004a, 2006), Goforth et al. (2020), Kheirkhah et al. (2009), Leeming y Saccomanno (1994), Loza-Hernández y Gendreau (2020), Milazzo et al. (2002, 2010), Oggero et al. (2006), Paltrinieri et al. (2009), Purdy (1993), Saccomanno y Shortreed (1993), Schweitzer (2006), Verma (2012), Verma y Verter (2010), Verma et al. (2012), Xie et al. (2012)
Automotor + Marítimo	Ronza et al. (2007)
Automotor + Oleoducto	Bonvicini y Spadoni (2008)
Automotor + Ferroviario + Gasoducto	Hsu et al. (2016), LaFrance-Linden et al. (2001)
Automotor + Ferroviario + Marítimo	Reniers et al. (2010)
Automotor + Ferroviario + Marítimo + Oleoducto	Reniers y Dullaert (2013), Van Raemdonck et al. (2013)
Automotor + Ferroviario + Marítimo + Aeronáutico	Leonelli et al. (1999)

Tabla 2. Clasificación de los problemas de evaluación de riesgos en el transporte unimodal

Clasificación	Referencia
Automotor	Abkowitz et al. (1992, 2001), Ak et al. (2020), Allen y Wolkstein (1998), Alp (1995), Ambituni et al. (2015), Boulmakoul (2006), Brainard et al. (1996), Bryant y Abkowitz (2007), Brzozowska (2016), Cassini (1998), Chakrabarti y Parikh (2011, 2013), Clark y Besterfield-Sacre (2009), Cordeiro et al. (2016), Das et al. (2012), Erkut (1995), Erkut y Verter (1995, 1998), Fabiano y Palazzi (2010), Fabiano et al. (2002, 2005), Glickman (1991), Godoy et al. (2007), Goldberg y Hong (2019), Gregory y Lichtenstein (1994), Harwood et al. (1993), Huang et al. (2018), Hwang et al. (2001), Kang et al. (2013), Kara et al. (2003), Ke et al. (2020), Klein (1991), Kwon (2011), Landucci et al. (2017), Li et al. (2020), List et al. (1991), Lovett et al. (1997), MacGregor et al. (1994), Machado et al. (2018), Marseguerra et al. (2004), Martínez-Alegría et al. (2003), Milazzo et al. (2010), Niu y Ukkusuri (2020), Pamucar et al. (2016), Pet-Armacost et al. (1999), Pine y Marx (1997), Sattayaprasert et al. (2008), Scenna y Santa Cruz (2005), Schwarz (1995), Shen et al. (2014), Tena-Chollet et al. (2013), Thierheimer et al. (2010), Tinoco et al. (2016), Torretta et al. (2013), Vaidogas et al. (2012a, b), Verter y Kara (2001), Wang et al. (2012), Weigkricht y Fedra (1995), Yang et al. (2010), Zhang et al. (2000), Zhao y Ke (2017, 2019), Zhao y Verter (2015)
Ferroviario	Anderson y Barkan (2004), Bagheri (2009), Bagheri et al. (2011, 2014), Barkan et al. (2000, 2003), Cheng et al. (2016), Dennis (1996), Gheorghe et al. (2005), Glickman y Erkut (2007), Glickman y Golding (1991), Hassan et al. (2009), Hosseini y Verma (2017, 2018), Liu et al. (2013, 2014), Ovidi et al. (2020), Raj y Pritchard (2000), Saat et al. (2014), Van der Vlies y Suddle (2008), Verma (2011), Verma y Verter (2007)
Marítimo	Douligeris et al. (1997), Goerlandt y Montewka (2015), Qu et al. (2011), Roeleven et al. (1995), Soares et al. (2020), Van Dorp y Merrick (2011), Van Hengel y Kruitwagen (1994), Wang et al. (2016)
Aeronáutico	Hsu et al. (2016), LaFrance-Linden et al. (2001)
Ductos	Bonvicini et al. (2015), Ma et al. (2013), Vianello y Maschio (2014), Zhao et al. (2020)

Transporte unimodal de materiales peligrosos

Evolución de la evaluación de riesgos

Aunque los primeros estudios sobre evaluación de riesgos se remontan a la década de 1930, no fue hasta la década de 1980 cuando los países desarrollados empezaron a considerar seriamente el riesgo de transporte de materiales peligrosos y a estudiar los modelos de evaluación de riesgos de transporte y los métodos de selección de la ruta de transporte. Al principio, se utilizaban métodos cualitativos para evaluar el riesgo de transporte. Posteriormente, los investigadores desarrollaron modelos y métodos de evaluación de riesgos cuantitativos más precisos, que se utilizaron ampliamente en el transporte de materiales peligrosos. A pesar de la mejora de la teoría que aumentó la precisión de los modelos y métodos correspondientes, siguen existiendo ciertas limitaciones. Por lo tanto, esta revisión clasifica los modos de transporte por carretera y ferrocarril e identifica las características y problemas correspondientes.

Investigación cualitativa de riesgos (CLR)

CLR es la premisa de la investigación de riesgos en el transporte de materiales peligrosos. Proporciona la información básica necesaria para la investigación cuantitativa de riesgos (CTR). Glickman (1988) dividió diversas variables del accidente de fuga: en gravedad de la fuga, tipo de vehículo, tipo de transportista y estado de la carretera; e investigó los problemas del transporte de materiales peligrosos. Determinó que no es posible identificar los modos más seguros basándose en una respuesta general, ya que depende de la tasa de accidentes de fuga, que varía en función de la gravedad de la fuga, el tipo de transportista, el tipo de vehículo, el tipo de vía o carretera y otros factores como el tamaño y el diseño de los contenedores utilizados. Además, Harwood et al. (1990) investigaron la tasa de accidentes de camiones en diferentes rutas de transporte basándose en las distribuciones Chi-cuadrado y la distribución de Poisson, y determinaron que la tasa de accidentes depende de la geometría de la carretera, el volumen de tráfico, el tipo de carretera y la región (urbana o rural). A partir de estos estudios, se ha profundizado en el conocimiento de las características generales del transporte de mercancías peligrosas. Davies y Lees (1992) investigaron el entorno del transporte por carretera para una situación específica en Gran Bretaña. Presentaron el análisis estadístico de las distribuciones de accidentes y víctimas de diferentes tipos de vehículos y carreteras durante el transporte de materiales peligrosos. Del mismo modo, Hobeika et al. (1993) estudiaron las características de los accidentes de transporte de materiales peligrosos en Pensilvania (EE.UU.), y determinaron si las características de los accidentes son coherentes a partir de análisis separados y comparativos de tres bases de datos. Por el contrario, Vilchez et al. (1995) analizaron la proporción, la localización y el tipo de accidente en los sucesos de transporte de materiales peligrosos, utilizando una base de datos más completa, mientras que Montiel et al. (1996) realizaron un análisis estadístico de los accidentes de transporte de gas natural utilizando una base de datos específica, determinaron que la explosión, la pérdida de contención y el incendio son los principales tipos de accidentes. La mayoría de los estudios mencionados utilizaron estadísticas para analizar las características del transporte de materiales peligrosos. En general, la mayoría de estudios anteriores a mediados de los años 90 utilizaban métodos similares para CLR sobre el transporte de materiales peligrosos. Aunque determinados problemas no se analizaban a un nivel más profundo, constituían constituyeron la base del CTR posterior.

3.1.2. Investigación cuantitativa de riesgos (CTR)

CTR es el desarrollo de CLR basado en tecnología de ingeniería y métodos matemáticos, combinado con la estimación de las consecuencias y la frecuencia de los eventos (Hassan et al., 2009). La evaluación de riesgos, en la que se centra la investigación sobre el transporte de mercancías peligrosas, proporciona parámetros de riesgo y una base para la toma de decisiones en la planificación del transporte. Ang y Briscoe (1980) impulsaron un programa de predicción cuantitativa para la evaluación de riesgos basado en un sistema de transporte específico propuesto. En el primer año del proyecto, cuando se estableció el marco general del análisis del sistema, se presentó la información necesaria para aplicar con éxito el modelo de riesgo, se identificó y desarrolló la base de información primaria y, por último, se validó la prueba y la aplicación preliminar del modelo básico de riesgo en cada modo de transporte objeto del estudio. Para reflejar las características del riesgo de forma más objetiva, List et al. (1991) se centraron en la integración del análisis de riesgos y el trazado de rutas para el transporte terrestre, orientándose hacia una nueva dirección de análisis de la distribución de los resultados en lugar de la simple optimización de los valores esperados. Además, Rhyne (1994) introdujo un método de análisis cuantitativo del riesgo de los materiales peligrosos en el transporte por carretera desde una perspectiva macro. Del mismo modo, Patel y Horowitz (1994) estudiaron las rutas óptimas de transporte de materiales peligrosos. Current y Ratick (1995) establecieron un método de evaluación de riesgos multiobjetivo para el transporte por carretera de materiales peligrosos teniendo en

cuenta múltiples factores, como el riesgo, el equilibrio del transporte y el coste. Además, Boulmakoul et al. (1997) crearon un sistema espacial de apoyo a la toma de decisiones para la planificación del transporte de materiales peligrosos. Aunque la mayoría de los estudios anteriores se centran en métodos y marcos, no se analizan en profundidad los factores de impacto específicos ni los grados de impacto correspondientes. Bonvicini et al. (1998) y Pet-Armacost et al. (1999) investigaron los factores de incertidumbre en los riesgos del transporte por carretera de materiales peligrosos, lo que reveló la pertinencia de un análisis en profundidad. Basándose en esto, Leonelli et al. (1999) propusieron un modelo de evaluación de riesgos para el transporte por carretera contemplando diversos factores, como las sustancias peligrosas, las condiciones meteorológicas y las direcciones estacionales del viento. Además, Karkazis y Boffey (1995) establecieron el sistema de teoría del riesgo de accidente basado en la lesión mínima de la multitud considerando escenas de accidentes reales. Aparte de estos, los investigadores han llevado a cabo investigaciones relevantes desde tres perspectivas diferentes, incluyendo la trayectoria óptima, el modelo estructural y el algoritmo. Por ejemplo, Leonelli et al. (2000) propusieron un método de selección de ruta óptima basado en el análisis de riesgos para minimizar los costes de transporte. Fabiano et al. (2002) desarrollaron un modelo estructural de transporte común desde el origen hasta el destino, y estudiaron la toma de decisiones sobre riesgos y rutas de transporte. Kara et al. (2003) expusieron un algoritmo de optimización de dos rutas para analizar con precisión los riesgos del transporte de materiales peligrosos. Además, con el desarrollo de la tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG), Lepofsky et al. (1993), Martínez-Alegría et al. (2003), Bubbico et al. (2004a), Boulmakoul (2006), Bryant y Abkowitz (2007), Milazzo et al. (2010), Tena-Chollet et al. (2013), Saat et al. (2014), Brzozowska (2016), Cordeiro et al. (2016), Huang et al. (2018), Machado et al. (2018), Goldberg y Hong (2019) y Ak et al. (2020) investigaron los riesgos del transporte de materiales peligrosos utilizando tecnología SIG.

3.1.3. Características del modelo de riesgo

Es necesario clasificar y dimensionar los distintos modelos de evaluación del riesgo de las sustancias peligrosas debido a su diversidad y adaptabilidad. La presente revisión se centra en las dimensiones básicas utilizadas en los métodos de evaluación y modelización de riesgos, más que en los propios modelos de riesgo. En la Tabla 3 se resumen las características de los modelos de riesgo objeto de esta revisión.

1. *Probabilidad de accidente.* La probabilidad de accidente indica la posibilidad de que se produzcan accidentes de vehículos de transporte de mercancías peligrosas. Jia et al. (2011) informaron que las carreteras pueden dividirse en diferentes categorías, y la tasa de accidentes de cada categoría sigue siendo la misma. Normalmente, la probabilidad de accidente se refiere a la probabilidad de accidente de fuga grave. En cuanto a la probabilidad de incidentes, se han desarrollado varios modelos y métodos nuevos, como la lógica difusa, la técnica robusta y el análisis de distribución aleatoria, para mejorar el cálculo de la probabilidad en condiciones de incertidumbre (Ke et al., 2020; Zhao et al., 2020).

2. *Exposición de la población.* La consecuencia de riesgo más comúnmente considerada es la población en riesgo, que incluye principalmente a los residentes, el tráfico y las poblaciones especiales. En cuanto al riesgo para la población, si no existe una distribución de la población en la red, se considera la densidad de población aproximada de la región. La población de riesgo es la población residente media. La población de tráfico indica principalmente el número de personas implicadas en el transporte de materiales peligrosos. Como cambia significativamente con el tiempo, es adecuada para redes variables en el tiempo o aleatorias. En grandes autopistas con pocos o ningún residente cerca, la población de tráfico puede ser más importante que la población residente. Además, la población de hospitales o escuelas debe considerarse por separado de la población residente media debido a la alta densidad de población de estos edificios. Li y Leung (2011) informaron que diferentes valores de población dan lugar a diferentes consecuencias de riesgo.

3. *Riesgo medioambiental.* Las fugas de materiales peligrosos causan graves daños a los componentes del entorno natural, como el aire, el agua y el suelo. Por lo tanto, el análisis del riesgo ambiental de los diferentes modos de transporte se ha investigado cada vez más. Machado et al. (2018) y Cordeiro et al. (2016) utilizaron la tecnología SIG para evaluar los riesgos ambientales durante el transporte por carretera de materiales peligrosos. Zhao y Ke (2017) establecieron un modelo de optimización para minimizar el coste total y el riesgo, y evaluar el riesgo ambiental causado por la ubicación de las instalaciones de gestión de residuos explosivos, el nivel de inventario y la ruta de vehículos multidepósito. Saat et al. (2014) utilizaron el modelo de consecuencias medioambientales de los materiales peligrosos para desarrollar estimaciones probabilísticas de la exposición a diferentes escenarios de vertido a lo largo de la red ferroviaria norteamericana. Soares et al. (2020) y Van Hengel y Kruitwagen (1994) estudiaron el impacto de las fugas de materiales peligrosos en el océano y las aguas interiores, respectivamente. Dvorak et al. (2020) y Oturakci y Dagsuyu (2020) investigaron los métodos cualitativo y cuantitativo de evaluación del riesgo ambiental, respectivamente, para diferentes modos de transporte. Además, Zhao y Verter (2015) propu-

sieron un nuevo método de medición del riesgo ambiental teniendo en cuenta los componentes nocivos del aceite usado liberado en el aire.

Tabla 3. Características de los modelos de riesgo

Acrónimo	Valor característico	Característica del modelo de riesgo
PA	Probabilidad de accidente	Si se utilizan nuevos modelos y métodos, como la lógica difusa, la técnica robusta y el análisis de distribución aleatoria, se utilizan en el cálculo de la probabilidad de accidente.
PR	Población residente	El modelo evalúa los daños causados a la población residente.
PT	Población de tráfico	El modelo evalúa los daños causados a la población de tráfico.
PE	Población especial	El modelo evalúa los daños causados a la población especial alrededor de centros vulnerables, como escuelas u hospitales.
RMA	Riesgo medioambiental	En el modelo se tienen en cuenta los daños causados al entorno natural.
IN	Infraestructura	El modelo tiene en cuenta los daños causados a las infraestructuras.
MP	Materiales peligrosos	En el modelo se tienen en cuenta diferentes propiedades fisicoquímicas de los materiales peligrosos.
PP	Política de peaje	Reducir el tiempo de congestión o los daños mediante una política de peaje.
GM	Gestión de emergencias	Reducir el tiempo de respuesta o los daños mediante la gestión de emergencias.
RI	Riesgo inmobiliario	Riesgo de pérdidas económicas en la zona afectada.

4. *Infraestructuras.* Las consecuencias de los accidentes de transporte de materiales peligrosos en las infraestructuras de las zonas afectadas, como edificios, carreteras, puentes y otras estructuras, pueden ser graves, sobre todo en caso de incendio o explosión. Las lesiones secundarias y las pérdidas económicas causadas por los daños infligidos a las infraestructuras también pueden tenerse en cuenta durante la modelización.

5. *Materiales peligrosos.* Las propiedades físicas y químicas de los distintos materiales peligrosos varían considerablemente. Además, la viabilidad del modelo de evaluación de riesgos depende de la compatibilidad del modo de transporte y del tipo específico de materia peligrosa. Dado que los distintos materiales peligrosos pueden suponer diferentes amenazas para las personas, los bienes y el medioambiente, la gravedad de las amenazas se determina en función del modo de transporte y la compatibilidad correspondiente.

6. *Política de peajes o gestión de emergencias.* El riesgo de las materias peligrosas también puede evaluarse en función del tiempo, incluidos los atascos, los desplazamientos y el tiempo de respuesta en caso de emergencia. Esta evaluación del riesgo del transporte de materiales peligrosos basada en el tiempo se asocia a menudo con la política de peajes y la gestión de emergencias. La congestión y los tiempos de viaje pueden reducirse mediante una política de peajes razonable. Además, el rápido despliegue en la respuesta de emergencia puede evitar más pérdidas de vidas o daños al medioambiente circundante causados por accidentes, para minimizar las consecuencias (Wang et al., 2012; Zhao y Ke, 2019).

7. *Riesgo para la propiedad.* En el proceso de evaluación de riesgos, las normas de medición de riesgos mencionadas pueden entrar en conflicto. Para unificar y simplificar estos modelos, el método más económico consiste en calcular el riesgo inmobiliario de accidentes.

3.1.4. Limitaciones de la investigación teórica

Existen ciertos problemas comunes en el transporte de materiales peligrosos con varias particularidades en diferentes áreas, entornos y modos de transporte. La limitación de la investigación teórica es su incapacidad para

simplificar el transporte de materiales peligrosos, teniendo en cuenta los supuestos pertinentes y captando las contradicciones primarias e ignorando las secundarias (Erkut et al., 2007).

1. *Suposición de la misma siniestralidad.* Durante la modelización, el trayecto desde el origen hasta el destino se divide en varias unidades, y se supone que la probabilidad de accidentes es la misma para cada unidad. Sin embargo, la tasa de accidentes en el mundo real varía con el grado de las carreteras, las condiciones meteorológicas, las propiedades de la carretera y la distribución del tiempo. Por lo tanto, la suposición de la misma tasa de accidentes no refleja realmente la tasa de accidentes real del transporte. Esta implica que la ley básica del accidente debe ser analizada.
2. *Supuesto de transporte continuo.* Los modelos de riesgo de transporte existentes se basan en el supuesto potencial de un transporte continuo; en otras palabras, la ocurrencia de accidentes no afecta al transporte normal. Sin embargo, en situaciones reales, la existencia de incendios, explosiones y otros tipos de accidentes de transporte de materiales peligrosos, a menudo, indican el final del transporte. Por lo tanto, el modelo de riesgo del transporte discontinuo de mercancías peligrosas debe establecerse introduciendo la hipótesis del transporte discontinuo y adoptando la teoría aleatoria de la cadena de Markov.
3. *Cálculo del riesgo en una sola población.* La mayoría de los modelos de evaluación de riesgos existentes solo tienen en cuenta el riesgo de accidentes para la población y no incorporan los daños causados al ambiente y a la propiedad. En consecuencia, la evaluación del riesgo presenta ciertas limitaciones y unilateralidad. Por lo tanto, deben establecerse modelos de riesgo para el ambiente y la propiedad a fin de determinar el riesgo total del transporte.
4. *Cálculo de catástrofes de un solo tipo.* Normalmente, durante la evaluación de riesgos solo se tiene en cuenta un único tipo de accidente y sus consecuencias perjudiciales. Las características inflamables y explosivas de los materiales peligrosos determinan la diversidad del tipo de catástrofe. Por lo tanto, es necesario establecer un modelo integral de peligros de incendio, explosión, toxicidad y otros tipos de catástrofe, y determinar el peso de los distintos accidentes en función de las diferentes probabilidades de que se produzcan.
5. *Cálculo del valor mínimo de riesgo.* La mayoría de los modelos de evaluación de riesgos existentes utilizan el riesgo mínimo como camino óptimo, teniendo en cuenta el valor en riesgo. Aunque esta idea es razonable, no incluye el coste del transporte. El valor mínimo de riesgo suele indicar que el transporte debe evitar las zonas densamente pobladas y viajar por rutas remotas, lo que aumenta la duración y el coste del transporte. Por lo tanto, debe establecerse un modelo de decisión de ruta óptima de riesgo-coste.

3.2. Modelo de evaluación de riesgos del transporte por carretera

Dado que existen múltiples modelos de evaluación de riesgos del transporte por carretera con características y defectos únicos, la elección del modelo debe considerarse cuidadosamente. Erkut y Verter (1998) demostraron mediante un análisis empírico que los distintos modelos de riesgo suelen elegir rutas óptimas diferentes para el transporte de mercancías peligrosas entre un par origen-destino especificado, y que la ruta óptima de un modelo puede no ser óptima para un modelo diferente. Esto indica que la modelización del riesgo del transporte de mercancías peligrosas es esencial. Basándose en la recopilación y el análisis sistemático de los estudios sobre la evaluación de riesgos del transporte de mercancías peligrosas anteriores a 2007, Erkut et al. (2007) determinaron que la mayoría de esos estudios se centraban en los riesgos del transporte por carretera. Erkut e Ingolfsson (2005) señalaron que el riesgo del transporte de materiales peligrosos se suele cuantificar mediante una fórmula de medición basada en la trayectoria. Por ejemplo, la ruta r comprende una serie de nodos ordenados $\{1, 2, \dots, n\}$, donde P_i denota la probabilidad de accidente de cada tramo de carretera i y C_i indica la consecuencia de accidente de cada tramo de carretera i . Basándose en uno o dos de estos atributos de ruta, los investigadores han establecido modelos de medición del riesgo (Tabla 4). En la Tabla 4, D es la población total en la región de impacto a lo largo de la sección i , q es el parámetro de preferencia de riesgo, k es el parámetro de peso de aversión a la catástrofe, α es el nivel de confianza, β es el nivel de consecuencia, $R^{\wedge}1$ es la consecuencia esperada de un camión de materiales peligrosos que viaja a lo largo de la ruta l , Pr es la función de distribución conmutativa.

El modelo de riesgo tradicional (RT) propuesto por Alp (1995) pretende minimizar el valor esperado de las consecuencias adversas causadas por los camiones de mercancías peligrosas a lo largo de la ruta. Debido a la complejidad computacional de este modelo establecido, Jin y Batta (1997) lo aproximaron y obtuvieron finalmente el modelo RT que figura en la Tabla 4. El modelo de probabilidad de incidente (PI) propuesto por Saccomanno y Chan (1985) y el modelo de exposición de la población (EP) propuesto por ReVelle et al. (1991) son los casos extremos del modelo RT. El primero se centra solo en la probabilidad de accidentes, mientras que el segundo lo hace en las consecuencias totales en la zona afectada por el transporte de materiales peligrosos. RT, EP e PI son modelos neutrales al riesgo y

suelen ser utilizados por los transportistas de mercancías peligrosas. Sin embargo, a la hora de planificar y tomar decisiones sobre el transporte de materiales peligrosos en escenarios reales, los responsables de este trabajo de los departamentos gubernamentales y los residentes que pueden verse afectados por el transporte de materiales peligrosos tienen aversión al riesgo. Por ello, Abkowitz et al. (1992) establecieron el modelo de riesgo percibido (RP). Este modelo puede evitar hasta cierto punto la neutralidad al riesgo de los responsables de la toma de decisiones añadiendo parámetros de ponderación que reflejen su preferencia por el riesgo. Además, Erkut e Ingolfsson (2000) establecieron tres modelos para evitar catástrofes durante el transporte de materiales peligrosos.

El modelo minmax (MM) pretende evitar la catástrofe minimizando el riesgo máximo en todo el proceso de transporte. El modelo de desutilidad (DU) pretende identificar el camino de la media y la varianza mínimas, y el modelo de media-varianza (MV) introduce la teoría de la utilidad. Los siete modelos mencionados incluyen un único atributo, en el que puede añadirse la función objetivo. En cambio, el modelo de riesgo condicional (RC) propuesto por Sivakumar et al. (1995) incluye los atributos RT y PI, que no son aditivos. Teniendo en cuenta que solo se puede obtener una ruta cuando se utiliza el modelo RC de materiales peligrosos para la toma de decisiones sobre rutas y que ciertos modelos no consideran explícitamente la preferencia de riesgo de los responsables de la toma de decisiones, Kang et al. (2013) y Kwon (2011) introdujeron los modelos de valor en riesgo (VaR) y de valor en riesgo condicional (VaRC) en el ámbito del transporte de materiales peligrosos. Estos modelos pueden satisfacer los requisitos de preferencia de riesgo de los responsables de la toma de decisiones y abordar los inconvenientes de los otros modelos, como la falta de escalabilidad y expresividad. Erkut y Verter (1995, 1998) consideraron tres axiomas como normas para la viabilidad de los modelos de riesgo. Los tres axiomas son: (1) axioma de monotonicidad de evaluación de trayectorias, (2) axioma de monotonicidad de atributos, y (3) principio de optimalidad de selección de trayectorias. El modelo de evaluación de riesgos que viola estos axiomas causa problemas teóricos y genera ciertas selecciones de rutas poco razonables. Sin embargo, el modelo no tiene por qué satisfacer todos los axiomas. La Tabla 4 resume los resultados obtenidos tras comparar los ocho modelos tradicionales de evaluación de riesgos.

Tabla 4. Modelos de riesgo del transporte de mercancías peligrosas

Enfoque	Modelo	Apetito de riesgo ¹	Si los axiomas se cumplen	Referencias de muestra
Riesgo tradicional (RT)	$RT(r) = \sum_{i \in r} P_i C_i$	Neutral	No	Alp (1995)
Exposición de la población (EP)	$EP(r) = \sum_{i \in r} D_i$	Neutral	Sí	ReVelle et al. (1991)
Probabilidad de incidencia (PI)	$PI(r) = \sum_{i \in r} P_i$	Neutral	Sí	Saccomanno y Chan (1985)
Riesgo percibido (RP)	$RP(r) = \sum_{i \in r} P_i C_i^q$	Averso	No	Abkowitz et al. (1992)
Media-varianza (MV)	$MV(r) = \sum_{i \in r} (P_i C_i + k P_i C_i^2)$	Averso	No	Erkut e Ingolfsson (2000)
Desutilidad (DU)	$DU(r) = \sum_{i \in r} P_i (\exp(k C_i) - 1)$	Averso	No	Erkut e Ingolfsson (2000)
Minimax (MM)	$MM(r) = \max_{i \in r} C_i$	Averso	Sí	Erkut e Ingolfsson (2000)
Riesgo condicional (RC)	$DU(r) = \sum_{i \in r} P_i (\exp(k C_i) - 1)$	Averso	No	Sivakumar et al. (1993)
Valor en riesgo (VaR)	$MM(r) = \max_{i \in r} C_i$	Ajustable	-----	Kang et al. (2013)
Valor en riesgo condicional (VaRC)	$RC(r) = \sum_{i \in r} P_i C_i / \sum_{i \in r} P_i$	Ajustable	-----	Kwon (2011)

1. El término apetito de riesgo remite a la cantidad de riesgo que se está dispuesto a tolerar para cumplir ciertos objetivos (Nota de la redacción de RSO).

Tabla 5. Problemas de evaluación del riesgo en el transporte por carretera

Referencia	Método de investigación		Limitación	Característica del riesgo		Modelo de riesgo
	CLR	CTR		PA	Otros	
Glickman (1991)		✓	1, 2, 5		PT, IM	RT
Klein (1991)		✓	1, 2, 5		PT	RT
List et al. (1991)	✓		1, 2, 3		PR, IM	—
Abkowitz et al. (1992)		✓	4, 5		PR	RP
Harwood et al. (1993)		✓	1, 2, 4		PR	PI
Gregory y Lichtenstein (1994)	✓		1, 2		Ninguno	—
MacGregor et al. (1994)	✓		1, 2		Ninguno	—
Alp (1995)		✓	1, 2, 5		PR, IM, MP	RT
Erkut (1995)	✓		1, 2		Ninguno	—
Erkut y Verter (1995)		✓	3, 5		PR, PE	PI
Schwarz (1995)	✓		1, 2		PR, MP	—
Weigkricht y Fedra (1995)	✓		1, 2	✓	PR, RMA, IM	—
Brainard et al. (1996)		✓	1, 2		PR	Ninguno
Lovett et al. (1997)		✓	1, 2, 4		PR, RMA	EP
Pine y Marx (1997)	✓		1, 2, 3		Ninguno	—
Allen y Wolkstein (1998)		✓	1, 2, 4		PR	RT
Cassini (1998)		✓	1, 2, 5		PT	Ninguno
Erkut y Verter (1998)		✓	2, 5		PR	RT, EP, PI
Pet-Armacost et al. (1999)		✓	1, 2, 3	✓	PR, MP	Ninguno
Zhang et al. (2000)		✓	1, 2	✓	PR, RMA	EP
Abkowitz et al. (2001)		✓	1, 2		PR, RMA, MP, GM	Ninguno
Hwang et al. (2001)		✓	1, 2, 5	✓	PR, MP	RT
Verter y Kara (2001)		✓	1, 2, 4	✓	PR	EP
Fabiano et al. (2002)		✓	2, 5		PR, IM	EP
Kara et al. (2003)		✓	1, 5		PR	PI, EP
Martínez-Alegria et al. (2003)		✓	4, 5	✓	PR, RMA	Ninguno
Marseguerra et al. (2004)		✓	1, 2	✓	PR, GM	Ninguno
Fabiano et al. (2005)		✓	2, 3, 5		PR, GM	PI
Scenna y Santa Cruz (2005)		✓	3, 4	✓	MP	RT
Boulmakoul (2006)		✓	2, 3, 5	✓	PR, IM	RT
Bryant y Abkowitz (2007)		✓	1, 2, 5		PR	EP
Godoy et al. (2007)		✓	1, 2	✓	PR, GM	RT
Sattayaprasert et al. (2008)		✓	1, 2		PR	EP
Clark y Besterfield-Sacre (2009)		✓	2, 4	✓	PR	Ninguno
Fabiano y Palazzi (2010)	✓		1, 2, 5		PR	—
Milazzo et al. (2010)		✓	4, 5	✓	PR, RMA	Ninguno
Thierheimer et al. (2010)	✓		1, 5		PR, RMA, MP	—
Yang et al. (2010)	✓		4, 5		PR, RMA	—
Chakrabarti y Parikh (2011)	✓		2, 5		PR, MP	—
Kwon (2011)		✓	5		PR	VaRC
Das et al. (2012)		✓	1, 2, 3		PT	Ninguno
Vaidogas et al. (2012a)		✓	1, 2, 5	✓	Ninguno	RT
Vaidogas et al. (2012b)		✓	1, 2, 5		Ninguno	RT
Wang et al. (2012)		✓	1, 2	✓	PR, PP	EP
Chakrabarti y Parikh (2013)		✓	2, 5		PR, MP	EP
Kang et al. (2013)		✓	5	✓	PR	VaR
Tena-Chollet et al. (2013)		✓	1, 2, 5	✓	PR, RMA, IM, MP	RT
Torretta et al. (2013)		✓	2, 5	✓	PR, PE	RT
Shen et al. (2014)	✓		1, 2		Ninguno	—
Ambituuni et al. (2015)	✓		1, 2		PR	—
Zhao y Verter (2015)		✓	2, 4	✓	PR, RMA	EP
Brzozowska (2016)		✓	1,2		RMA, IM	Ninguno
Cordeiro et al. (2016)		✓	2, 5	✓	MP	EP
Pamucar et al. (2016)		✓	1, 2	✓	PR	Ninguno
Tinoco et al. (2016)		✓	1, 2		PR, RMA	Ninguno
Landucci et al. (2017)		✓	1, 2, 5		PR	Ninguno
Zhao y Ke (2017)		✓	4, 5	✓	PR, RMA, IM	MM
Huang et al. (2018)		✓	1, 2	✓	PR, RMA	RT
Machado et al. (2018)		✓	1, 2		PR, RMA, IM	Ninguno
Goldberg y Hong (2019)		✓	2, 4, 5	✓	PR, IM	EP
Zhao y Ke (2019)		✓	1, 2	✓	PR, RMA	Ninguno
Ak et al. (2020)		✓	2, 3	✓	PT	Ninguno

Referencia	Método de investigación		Limitación	Característica del riesgo		Modelo de riesgo
	CLR	CTR		ACP	Otros	
Ke et al. (2020)		✓	1, 2, 4	✓	PR, RMA, PP	EP
Li et al. (2020)		✓	2, 4	✓	PT, RMA	Ninguno
Niu and Ukkusuri (2020)		✓	2, 4	✓	PR	Ninguno

Para explicar mejor la evolución de los problemas de evaluación de riesgos en el transporte por carretera, hemos clasificado la bibliografía en el cuadro 5. Desde una perspectiva del desarrollo técnico, Glickman (1991) utilizó la información existente para acelerar la evaluación de riesgos. List et al. (1991) revisaron el desarrollo del modelo de la optimización con un solo criterio al análisis multiobjetivo, centrándose en una nueva dirección de análisis de la distribución de resultados en lugar de limitarse a optimizar los valores esperados. Alp (1995) analizó las técnicas de evaluación cuantitativa del riesgo y examinó los métodos de medición del riesgo. Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología, los SIG y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones en la evaluación de riesgos del transporte de materiales peligrosos (Boulmakoul, 2006; Brainard et al., 1996; Bryant y Abkowitz, 2007; Brzozowska, 2016; Cordeiro et al., 2016; Goforth et al., 2020; Lovett et al., 1997; Machado et al.; Milazzo et al., 2010; Weigkricht y Fedra, 1995). Por ejemplo, Brainard et al. (1996) y Lovett et al. (1997) analizaron el riesgo del transporte de residuos peligrosos líquidos utilizando tecnología SIG. Goforth et al. (2020) utilizaron la tecnología SIG para proponer un programa multiobjetivo que facilita el análisis y la selección de rutas mínimamente para el transporte de residuos peligrosos.

Además, en términos de factores de influencia, Abkowitz et al. (1992) calcularon riesgos considerando los cinco factores principales, a saber, la distancia de transporte, el tiempo de transporte, la probabilidad de accidente de fuga, la exposición de la población y el riesgo. Harwood et al. (1993) se centraron en la tasa de accidentes y la tasa de fugas. Allen y Wolkstein (1998) determinaron los riesgos asociados al transporte urbano de residuos peligrosos, considerando los problemas de modelización en términos de tasa de accidentes de transporte, características de los accidentes, impacto de la radiación térmica, exposición a sustancias químicas tóxicas y umbral de riesgo aceptable. Yang et al. (2010) y Cordeiro et al. (2016) consideraron principalmente los factores ambientales, mientras que Ambituuni et al. (2015) se centraron sobre todo en los factores humanos. Además, los investigadores han analizado diferentes riesgos teniendo en cuenta la naturaleza de las sustancias peligrosas. Schwarz (1995) estudió los materiales radiactivos, y Cassini (1998) se centró en seis sustancias químicas tóxicas por inhalación, GLP, gasolina y explosivos. Scenna y Santa Cruz (2005) investigaron la evaluación de riesgos de las fugas de gas cloro. Chakrabarti y Parikh (2011, 2013) se centraron en los materiales peligrosos de clase 2 y 3. Posteriormente, Abkowitz et al. (2001) desarrollaron un método para evaluar el impacto económico de accidentes de transporte de materiales peligrosos. Martínez-Alegría et al. (2003) determinaron la probabilidad de accidente y la gravedad de la pérdida basándose en el cálculo del riesgo y aplicaron un modelo matemático al SIG. Pamucar et al. (2016) propusieron un nuevo método de evaluación de costes y riesgos para la selección multiobjetivo de rutas de transporte en la red de carreteras urbanas. Por último, desde otras perspectivas, varios investigadores establecieron un marco para la evaluación cuantitativa del riesgo (Das et al., 2012; Erkut y Verter, 1995; Fabiano y Palazzi, 2010; Fabiano et al., 2002, 2005). Kara et al. (2003) propusieron dos algoritmos para la selección de rutas de transporte, y Torretta et al. (2013) desarrollaron un algoritmo mejorado de evaluación de riesgos. Pet-Armacost et al. (1999) estudiaron el impacto del dispositivo del transporte de hidracina en el tanque de almacenamiento. Clark y Besterfield-Sacre (2009) establecieron el modelo de toma de decisiones para la liberación de sustancias peligrosas durante el proceso de descarga. Huang et al. (2018) determinaron un modelo regional de evaluación de riesgos considerando el transporte de materiales peligrosos por autopistas utilizando un método funcional integrado, incluida la frecuencia de accidentes, la intensidad y vulnerabilidad; aplicaron el modelo a la autopista Beijing-Tibet para demostrar su funcionalidad y viabilidad. Li et al. (2020) propusieron un método de análisis de riesgos en tiempo real, basado en la red bayesiana difusa, considerando el transporte en un petrolero, que refleja dinámicamente los cambios en la probabilidad de accidentes y el nivel de consecuencias del transporte de petroleros por carretera.

3.3. Modelo de evaluación de riesgos del transporte ferroviario

La mayoría de los estudios sobre el riesgo del transporte ferroviario de materiales peligrosos se centran principalmente en los datos de accidentes pasados y mejoran la seguridad del transporte ferroviario de materiales peligrosos optimizando la ruta de transporte y la estrategia de colocación de la carga. Glickman (1983) comprobó que el riesgo del transporte ferroviario de materiales peligrosos puede reducirse optimizando la ruta de operación del tren. Saccomanno y El-Hage (1989) determinaron que las estrategias eficaces de clasificación y amortiguación pueden reducir la posibilidad de descarrilamiento de vehículos especiales de mercancías peligrosas, analizando

los factores que provocan los descarrilamientos. Dennis (1996) propuso un método de cálculo para determinar el coste del riesgo de fugas importantes de mercancías peligrosas en el transporte ferroviario, considerando la perspectiva riesgo-costo. Basándose en el cálculo y el análisis, el estudio concluyó que el costo del riesgo de las mercancías más peligrosas por unidad de exposición es de cinco a diez veces superior al de la mayoría de las demás mercancías. Verma (2011) analizó los registros de accidentes de la Administración Federal de Ferrocarriles (FRA) y determinó que el riesgo en la parte delantera del tren es relativamente grande y que las partes 7/10-9/10 de cualquier longitud de un tren de mercancías son el lugar más seguro para transportar cargas peligrosas. Bagheri et al. (2011) propusieron una estrategia de colocación que puede reducir el riesgo de mercancías peligrosas mediante la clasificación de los trenes en un canal de transporte preestablecido. Otros investigadores se han centrado principalmente en reducir los accidentes y la probabilidad de fugas mejorando el diseño de las cisternas para mercancías peligrosas. Por ejemplo, Raj y Pritchard (2000) informaron que el diseño de la cisterna DOT-105 es más seguro que el del tipo 111, y Barkan et al. (2000) determinaron que el índice de fugas es menor en las cisternas equipadas con un dispositivo reductor de la presión de fluctuación.

Para obtener el modelo de evaluación del riesgo del transporte ferroviario de materias peligrosas, varios estudios han añadido ciertas características específicas de ese modo para ampliar el modelo de evaluación del riesgo del transporte por carretera. La Tabla 6 resume la clasificación de los problemas de evaluación del riesgo del transporte ferroviario. Hassan et al. (2009) señalaron que la evaluación de los errores humanos no puede ignorarse en la evaluación del riesgo del transporte ferroviario de materiales peligrosos. Bagheri (2009) utilizó diferentes técnicas cuantitativas de análisis de riesgos para evaluar el riesgo de impacto de los vehículos ferroviarios peligrosos estacionados junto a la línea principal, y proporcionó sugerencias para reducir los riesgos pertinentes. Para establecer un modelo de evaluación de riesgos combinado con las características de los accidentes ferroviarios, Verma (2011) estudió la información de los accidentes de descarrilamiento de trenes de mercancías de la FRA entre 1995 y 2009. En él, se determinó que las principales causas de los accidentes ferroviarios eran los factores humanos, la vía, la cama de balasto y la estructura; los fallos mecánicos, eléctricos y de señalización e información. Además, se determinó que la probabilidad de incidente de los vehículos con materiales peligrosos se ve afectada por las probabilidades de descarrilamiento y fuga en un vagón que contiene materiales peligrosos. Por lo tanto, se desarrolló una nueva metodología teniendo en cuenta las características del tren y del accidente. Basándose en los estudios mencionados, Bagheri et al. (2014) establecieron un modelo de consecuencias esperadas relativamente completo para medir el riesgo de ruta del transporte ferroviario de mercancías peligrosas. Además, Bagheri et al. (2011) introdujeron características relacionadas con el ferrocarril en el modelo RT de medición del riesgo de ruta para obtener el modelo RT del riesgo de transporte ferroviario. Saat et al. (2014) analizaron el transporte ferroviario de mercancías peligrosas en Norteamérica y presentaron el modelo de consecuencias medioambientales del transporte de mercancías peligrosas, que puede utilizarse para calcular el riesgo medioambiental del transporte de este tipo de cargas. Liu et al. (2014) propusieron un modelo probabilístico para estimar la distribución de probabilidad del contenido liberado por el vagón cisterna durante el descarrilamiento. En los últimos años, se han utilizado varios modelos nuevos, como el VaR y el VaRC, en la evaluación del riesgo del transporte ferroviario. Estos modelos pueden reflejar mejor la preferencia por el riesgo de los responsables de la toma de decisiones que los modelos tradicionales. Hosseini y Verma (2017, 2018) adoptaron el método del VaR y el VaRC para seleccionar la ruta del transporte ferroviario de materiales peligrosos teniendo en cuenta las preferencias de riesgo de los responsables de la toma de decisiones.

3.4. Revisión de la evaluación de riesgos para el transporte unimodal

La investigación sobre el modelo de evaluación de riesgos del transporte unimodal de mercancías peligrosas es exhaustiva. En el estudio del riesgo del transporte por carretera, los modelos de evaluación del riesgo para la neutralidad del riesgo (Alp, 1995; Jin y Batta, 1997; Saccomanno y Chan, 1985) y la aversión al riesgo (Abkowitz et al., 1992; Erkut e Ingolfsson, 2000; ReVelle et al., 1991; Sivakumar et al., 1995) de los responsables de la toma de decisiones se investigan con PI conocidos y desconocidos (Abkowitz et al., 1992; Alp, 1995; Erkut e Ingolfsson, 2000; Jin y Batta, 1997; Kang et al., 2013; Kwon, 2011; ReVelle et al., 1991; Saccomanno y Chan, 1985; Sivakumar et al., 1995). La mayoría de los estudios amplían el modelo de evaluación del riesgo del transporte por carretera para comprender el riesgo del transporte ferroviario, teniendo en cuenta sus características (Bagheri et al., 2011, 2014; Verma, 2011).

4. Transporte intermodal de materiales peligrosos

4.1. Comparación de modos

La investigación sobre la evaluación de riesgos del transporte intermodal de materiales peligrosos se centra en la comparación de las ventajas y desventajas entre modos de transporte. Entre 1990 y 2000, los inves-

tigadores creían en general que no existían diferencias significativas en el riesgo del transporte de materiales peligrosos por ferrocarril y carretera (Leeming y Saccomanno, 1994; Purdy, 1993; Saccomanno et al., 1990). Por ejemplo, Saccomanno et al. (1990) compararon el transporte de materiales peligrosos por ferrocarril y carretera e informaron que el modo de transporte más seguro depende del tipo y volumen de los materiales peligrosos. Purdy (1993) estudió el transporte de cloro y determinó que las carreteras son adecuadas para su uso en zonas con impactos más leves, como poblaciones densas, mientras que el ferrocarril es adecuado para otras zonas. Leeming y Saccomanno (1994) estudiaron la elección del transporte de cloro por ferrocarril y carretera en las principales instalaciones de procesamiento industrial del Reino Unido e informaron que, aunque el riesgo del transporte de materiales peligrosos por ferrocarril y carretera no difiere significativamente, el transporte por ferrocarril tiene un mayor impacto en los residentes de los alrededores de las instalaciones. Contradiciendo la conclusión de la investigación en esta fase, Kornhauser et al. (1994) estudiaron el caso del transporte de amoníaco anhidro y consideraron la diferencia de volumen de carga entre los dos modos; determinaron que el riesgo del transporte por ferrocarril es menor que el del transporte por carretera.

Tabla 6. Problemas de evaluación de riesgos en el transporte ferroviario

Referencia	Método de investigación		Limitación	Característica de riesgo		Modelo de riesgo
	CLR	CTR		ACP	Otros	
Glickman y Golding (1991)	✓		1, 2, 3, 5		Ninguna	-
Dennis (1996)	✓		1, 2, 3		RMA	-
Barkan et al. (2000)	✓		1, 2		Ninguna	-
Raj y Pritchard (2000)	✓		1, 2, 3, 5		PR, MP	-
Barkan et al. (2003)	✓		1, 2		Ninguna	-
Anderson y Barkan (2004)	✓		1, 2		Ninguna	-
Gheorghie et al. (2005)		✓	1, 2, 3, 5	✓	PR, IM	EP
Glickman y Erkut (2007)		✓	1, 3		MP	RT
Verma y Verter (2007)		✓	1, 5	✓	PR, RMA	EP
Van der Vlies y Suddle (2008)	✓		1, 5		Ninguna	-
Bagheri (2009)		✓	1, 2		PR, RMA, MP	Ninguno
Hassan et al. (2009)		✓	3, 5		Ninguna	Ninguno
Bagheri et al. (2011)		✓	3, 5		PR	RT
Verma (2011)		✓	1, 2	✓	Ninguna	RT
Liu et al. (2013)	✓		1, 2			-
Bagheri et al. (2014)		✓	1, 5	✓	PR	Ninguno
Liu et al. (2014)		✓	1, 2, 5	✓	Ninguna	PI
Saat et al. (2014)		✓	1, 2	✓	PR, RMA	RT
Cheng et al. (2016)		✓	1, 2	✓	PR	EP
Hosseini y Verma (2017)		✓	5	✓	PR	VaR
Hosseini y Verma (2018)		✓	5	✓	PR	VaR C
Ovidi et al. (2020)		✓	1, 2	✓	PR, MP	Ninguno

Desde el año 2000 hasta la actualidad, los investigadores han llegado a conclusiones más coherentes al considerar las características del transporte de materiales peligrosos por ferrocarril y por carretera de forma individual. Por ejemplo, Mazzarotta (2002) estableció un método cuantitativo de análisis de riesgos para el transporte de materiales peligrosos, transfiriendo parte de los materiales peligrosos de Sicilia (Italia) del transporte por carretera al transporte por ferrocarril. Este método determinó que el área de impacto del transporte ferroviario es mayor que la del transporte por carretera si se tiene en cuenta el volumen de transporte; sin embargo, el PI del transporte ferroviario es sustancialmente menor que el del transporte por carretera. Bubbico et al. (2004a) estudiaron el transporte de amoníaco y tuvieron en cuenta la densidad de población dentro y fuera de la ruta; informaron que el transporte ferroviario de materiales peligrosos es más seguro. Además, Bubbico et al. (2004b) propusieron un método simplificado para el análisis de riesgos del transporte de mercancías peligrosas por carretera y ferrocarril. Utilizaron el transporte de óxido de etileno como ejemplo para concluir que la probabilidad y el riesgo total de accidentes en el transporte ferroviario son inferiores a los del transporte por carretera. Bubbico et al. (2006) también informaron que los transportistas pueden reducir los riesgos cambiando las rutas de transporte y transfiriendo algunos materiales peligrosos de la carretera al ferrocarril o mediante el transporte intermodal. Bagheri et al. (2014) estudiaron el transporte de cloro y amoníaco por ferrocarril y carretera en Estados Unidos e informaron que el transporte por ferrocarril puede reducir los riesgos. Esta conclusión no se ve afectada por los cambios en los modelos de eva-

luación de riesgos y los corredores de transporte. Por último, Goforth et al. (2020) y Loza-Hernández y Gendreau (2020) utilizaron la teoría de redes complejas y consideraron el riesgo en los nodos de la red de transporte, respectivamente, para desarrollar un marco de evaluación de riesgos del transporte intermodal ferrocarril-camión.

4.2. Modelo de evaluación de riesgos para el transporte intermodal

En el proceso de discusión de la planificación y gestión del transporte intermodal de mercancías peligrosas por ferrocarril y camión, Verma (2012), Verma y Verter (2010) y Verma et al. (2012) dividieron el riesgo del transporte intermodal ferrocarril-carretera en tres segmentos, a saber, los riesgos del transporte por carretera de las estaciones ferroviarias de entrada y salida y el riesgo del transporte ferroviario. Verma y Verter (2010) y Verma et al. (2012) consideraron el EP como índice de medición del riesgo, mientras que Verma (2012) utilizó las consecuencias esperadas como índice de medición del riesgo. Xie et al. (2012) también utilizaron la consecuencia esperada como índice de medición del riesgo en su estudio sobre la selección de ruta de materiales peligrosos a través del transporte intermodal ferrocarril-carretera; definieron el riesgo total como la suma de los riesgos de transporte de cada sección de la ruta y el proceso de tránsito que tiene lugar en el nodo.

4.3. Revisión de la evaluación de riesgos para el transporte intermodal

En la actualidad, la investigación sobre la evaluación del riesgo intermodal es insuficiente. Lo que existe se centra principalmente en la comparación de los riesgos de los distintos modos de transporte (Bagheri et al., 2014; Bubbico et al., 2004a, 2004b, 2006; Goforth et al., 2020; Kornhauser et al., 1994; Leeming y Saccomanno, 1994; Loza-Hernández y Gendreau, 2020; Mazzarotta, 2002; Purdy, 1993; Saccomanno et al., 1990). Los primeros estudios comparaban condiciones de transporte específicas, por lo que los resultados de la investigación carecían de aplicabilidad universal. Posteriormente, los investigadores lo ampliaron a situaciones más generales, informando que el transporte ferroviario e intermodal de materiales peligrosos es relativamente más seguro que el transporte por carretera (Bagheri et al., 2014; Bubbico et al., 2004a, 2004b, 2006; Kornhauser et al., 1994; Mazzarotta, 2002). Sin embargo, el estudio del modelo de evaluación de riesgos para el transporte intermodal presenta deficiencias sistemáticas. El transporte intermodal típico de materiales peligrosos incluye la conexión a corta distancia, el transporte a larga distancia y el proceso intermedio de recarga. Esto indica que los riesgos se ven afectados por el proceso de transporte y están asociados al proceso de recarga; sin embargo, no se trata de una simple superposición de ambos procesos. Por otra parte, algunos estudios existentes no tienen en cuenta los riesgos en el proceso de recarga o se limitan a apilar los riesgos en cada proceso (Loza-Hernández y Gendreau, 2020; Verma, 2012; Verma et al., 2012; Verma y Verter, 2010; Xie et al., 2012).

5. Ejemplo de análisis

En este estudio, modificamos la red y los parámetros construidos por Kang et al. (2013) para ilustrar las características de los modelos de evaluación de riesgos enumerados en la página 26-27. La red modificada consta de nueve nodos y doce aristas, en las que los datos entre paréntesis representan el PI y la consecuencia (Fig. 3). El riesgo de los nodos no se tiene en cuenta o se supone idéntico. Desde el origen 1 hasta el destino 9, se dispone de seis caminos, como se muestra en la Tabla 7. Debido a la falta de investigación sobre el modelo de evaluación de riesgos del transporte intermodal, hasta ahora no se ha realizado un análisis de casos.

Tabla 7. Trayectorias candidatas

Trayectorias	P1	P2	P3	P4	P5	P6
Rutas	1-2-3-6-9	1-2-5-6-9	1-2-5-8-9	1-4-5-6-9	1-4-5-8-9	1-4-7-8-9

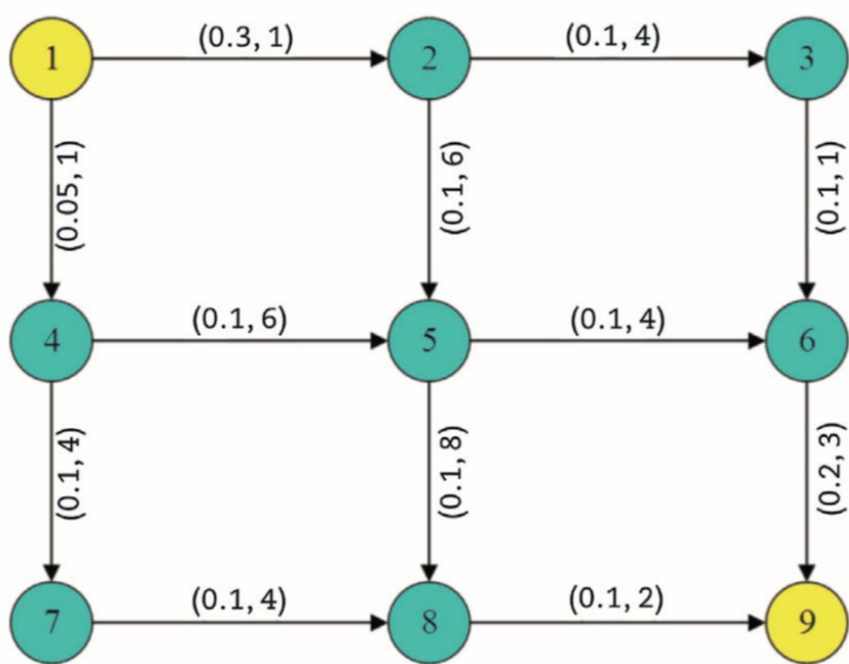
Considerando el trayecto 1 (P1) como ejemplo, obtuvimos la siguiente función de distribución acumulativa del riesgo.

$$(1) \quad F_R(r) = \begin{cases} 0 & r < 0 \\ 0.3 & 0 \leq r < 1 \\ 0.8 & 1 \leq r < 3 \\ 1 & 3 \leq r \end{cases}$$

El VaR correspondiente de P1 puede calcularse como sigue.

$$(2) \quad \text{VaR}_\alpha^{P_1} = \begin{cases} 0 & 0 < \alpha \leq 0.3 \\ 1 & 0.3 < \alpha \leq 0.8 \\ 3 & 0.8 < \alpha < 1 \end{cases}$$

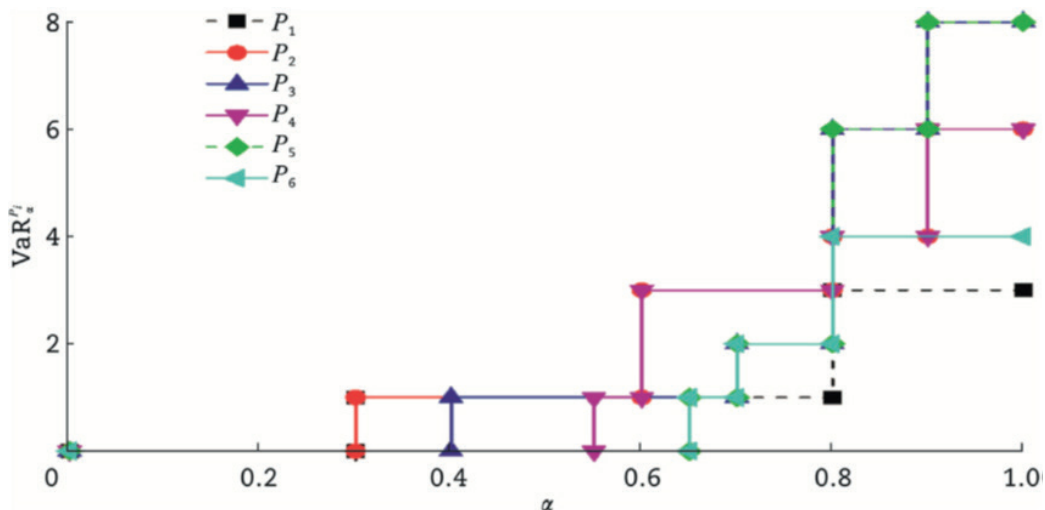
Figura 3. Red modificada para el transporte de materiales peligrosos



Un nivel de confianza α arbitrario puede tener diferentes valores de VaR diferentes. Por ejemplo, cuando $\alpha = 90\%$, el correspondiente valor VaR es 3. Esto implica que, en caso de accidente, existe al menos un 90% de posibilidades de mantener las consecuencias de P1 por debajo del valor de 3. En otras palabras, la probabilidad de que el riesgo de trayectoria sea superior a 3 es inferior al 10%. Sin embargo, el valor VaR de P1 es 1 $\alpha = 50\%$.

Del mismo modo, podemos obtener diferentes valores de VaR para seis caminos posibles con distintos niveles de confianza. La figura 4 ilustra el valor VaR de cada trayectoria candidata.

Figura 4. Opciones de trayectorias de valor en riesgo (VaR) con distintos niveles de confianza (α)



Basándonos en la selección de parámetros relevantes de Kang et al. (2013), nuestro ejemplo muestra los resultados del modelo RP con el parámetro $q = 0,5$, el modelo MV con el parámetro $k = 2$, y el modelo DU con el parámetro $k = 0,005$. De acuerdo con la fórmula de cálculo de cada modelo de evaluación de riesgos (Tabla 4), se pueden obtener diferentes valores de riesgo de cada ruta, que se enumeran en las Tablas 8 y 9, donde P^* denota la ruta óptima.

Tabla 8. Comparación de modelos de riesgo alternativos para seis rutas excluyendo el valor en riesgo (VaR) y el valor en riesgo condicional (VaRC)

Trayectoria	RT	EP	PI	RP	MV	DU	MM	RC
P1	1.40	9	0.70	0.95	9.00	0.0071	4	2.00
P2	1.90	14	0.70	1.09	16.50	0.0096	6	2.71
P3	1.90	17	0.60	0.97	23.30	0.0096	8	3.17
P4	1.65	14	0.45	0.84	15.75	0.0083	6	3.67
P5	1.65	17	0.35	0.72	22.55	0.0084	8	4.71
P6	1.05	11	0.35	0.59	8.35	0.0053	4	3.00
P^*	P6	P1	P5 P6	P6	P6	P6	P1 P6	P1

Tabla 9. Comparación entre el valor en riesgo (VaR) y el valor en riesgo condicional (VaRC) para las seis rutas.

Confidence level α	≤ 0.3		≤ 0.4		≤ 0.6		≤ 0.7		≤ 0.8		≤ 0.9		< 1.0	
	VaR	CVaR	VaR	CVaR	VaR	CVaR	VaR	CVaR	VaR	CVaR	VaR	CVaR	VaR	CVaR
P_1	0	1.00	1	1.16	1	1.75	1	2.33	1	2.75	3	4	3	4
P_2	0	2.36	1	3.00	1	4.00	3	4.33	3	5.00	4	6	6	6
P_3	0	2.71	0	3.17	1	4.25	1	5.33	2	7.00	6	8	8	8
P_4	0	2.36	0	3.00	1	4.00	3	4.33	3	5.00	4	6	6	6
P_5	0	2.71	0	3.17	0	4.25	1	5.33	2	7.00	6	8	8	8
P_6	0	1.00	0	1.16	0	1.75	1	2.33	2	2.75	4	4	4	4
P^*	P_1-P_6	P_1, P_6	P_3-P_6	P_1, P_6	P_5, P_6	P_1, P_6	P_1, P_3, P_5, P_6	P_1, P_6	P_1	P_1, P_6	P_1	P_1, P_6	P_1	P_1, P_6

Los cálculos indican que, para un mismo caso, los resultados de los distintos modelos de evaluación varían. Los ocho modelos tradicionales de evaluación de riesgos pueden generar una única solución óptima o unas pocas soluciones óptimas con valores óptimos iguales. Por el contrario, los modelos VaR y VaRC pueden generar diferentes trayectorias óptimas con distintos niveles de confianza, lo que puede reflejar eficazmente el grado de preferencia por el riesgo de los responsables de la toma de decisiones. Aunque tanto el modelo VaR como el VaRC pueden reflejar las preferencias de riesgo de los responsables de la toma de decisiones modificando el nivel de confianza, el primero abarca tres preferencias, a saber, despreocupación por el riesgo, neutralidad ante el riesgo y aversión al riesgo, mientras que el segundo solo refleja la neutralidad ante el riesgo y la aversión al riesgo. Además, como el modelo VaR solo se centra en la parte en la que el riesgo no supera el valor VaR, no puede controlar la parte en la que el riesgo supera el valor VaR (Sarykalin et al., 2008). El modelo VaRC se centra en la parte del riesgo que supera el valor VaR. Teniendo en cuenta que, en el proceso de transporte de mercancías peligrosas, un riesgo elevado no conlleva una rentabilidad elevada (Kwon, 2011), creemos que el modelo VaRC es más adecuado para la evaluación del riesgo del transporte de mercancías peligrosas.

6. Desafíos en la evaluación de riesgos existentes

En el caso del transporte unimodal, los modelos y métodos de evaluación de riesgos existentes suelen centrarse en el transporte general de mercancías peligrosas, mientras que no se tiene en cuenta el cálculo de riesgos para

escenarios específicos y tramos especiales. Como se muestra en la figura 5, el cálculo del riesgo de accidente se complica cuando los vehículos con materiales peligrosos circulan por tramos especiales, como puentes y túneles. El entorno marino alrededor de un puente transversal es complejo, y la fuga del accidente puede provocar una contaminación secundaria marina. Además, el acoplamiento entre factores de riesgo es fuerte, y el accidente tiene un rango de impacto más amplio. Por el contrario, el entorno del túnel es relativamente cerrado. En caso de determinados accidentes, como fugas de gases tóxicos, incendios y explosiones, la ejecución de las operaciones de rescate es difícil y las consecuencias del accidente son graves. Los modelos de evaluación de riesgos existentes no pueden calcular con precisión los riesgos relacionados basándose en las consecuencias del accidente teniendo en cuenta la interacción de todos los factores de riesgo en todo el proceso.

Los modelos de evaluación de riesgos en el transporte se basan a menudo en diversos supuestos, lo que provoca una gran incertidumbre en sus resultados. Por lo tanto, el análisis de la incertidumbre es esencial en los modelos de riesgo del transporte. Sin embargo, debido a la precisión de los modelos de riesgos personales y sociales, la incertidumbre no suele ser tan elevada como la observada en las instalaciones industriales. Esto implica que la precisión y la viabilidad de los modelos de evaluación de riesgos deben mejorarse aún más. Además, en el caso de las redes de transporte modernas, deben tenerse en cuenta los efectos de amplificación o mitigación del riesgo de las características de las carreteras, las condiciones meteorológicas, las condiciones del tráfico y la capacidad de respuesta en caso de emergencia. El transporte de materiales peligrosos suele implicar los factores de tiempo y coste de transporte, en los que los costes y los riesgos varían en diferentes periodos con el tiempo. Para explorar más a fondo la relación entre el coste, el riesgo, el equilibrio de riesgos y el tiempo de transporte de materiales peligrosos, se puede utilizar un algoritmo heurístico para optimizar el conflicto entre los indicadores, que también es un reto en los métodos de evaluación existentes.

La mayoría de los estudios existentes sobre transporte intermodal se basan en los modos de transporte ferroviario y por carretera. A pesar del aumento de la demanda real en términos de coste, riesgo, ambiente y condiciones de las carreteras, la investigación sobre la optimización de la combinación de tres o más modos de transporte sigue siendo escasa. Tener en cuenta la ventana temporal y otros factores prácticos puede ayudar a controlar mejor el coste y el riesgo. Sin embargo, la combinación de varios modos de transporte aumenta la complejidad de los cálculos, y solo existen unos pocos modelos y algoritmos de amplia aplicabilidad.

Varios modelos y métodos existentes consideran un único objetivo. Sin embargo, el transporte intermodal implica múltiples objetivos, como el coste, el tiempo y el riesgo. Por lo tanto, la consideración de un único objetivo no puede resolver por completo los problemas prácticos. Además, los estudios actuales suponen que las personas implicadas en el transporte de mercancías peligrosas son completamente racionales, mientras que la racionalidad limitada es habitual en el mundo real. Debido a las particularidades del transporte de mercancías peligrosas, las personas pueden incluso comportarse de forma irracional en determinadas situaciones extremas. Por lo tanto, tener en cuenta los comportamientos subjetivos de las personas para el análisis de riesgos es también uno de los retos a los que se enfrentan los modelos de evaluación existentes.

Figura 5. Transporte de materiales peligrosos en tramos especiales. (a) Puente marítimo. (b) Túnel

(a)



(b)



Conclusiones

Este artículo presenta una revisión de los estudios sobre problemas de evaluación de riesgos en el transporte de mercancías peligrosas publicados en los últimos treinta años. Se presenta la bibliografía sobre los modelos y métodos de evaluación de riesgos del transporte de mercancías peligrosas. Además, se comparan las ventajas e inconvenientes de los distintos modos de transporte y se propone una nueva clasificación para el transporte unimodal. Las características de cada modelo de evaluación del transporte unimodal se analizan considerando un ejemplo. Las conclusiones de nuestra investigación pueden resumirse como sigue.

En los últimos años, la investigación sobre el riesgo del transporte por carretera de materiales peligrosos ha sido exhaustiva y se han propuesto más de diez tipos de modelos de evaluación de riesgos, como los modelos RT, PI y EP. El modelo de evaluación de riesgos del transporte ferroviario de materiales peligrosos se establece incorporando las características del transporte ferroviario a los modelos de evaluación de riesgos del transporte por carretera, incluidos los modelos de consecuencias previstas IP y EP. Teniendo en cuenta las características del volumen de tráfico y la probabilidad de accidente, el transporte ferroviario y el transporte intermodal de materiales peligrosos son los modos de bajo riesgo. Los operadores de transporte y los gobiernos pueden seleccionar los modos de transporte en función de las condiciones locales en el proceso de toma de decisiones sobre el transporte de materiales peligrosos. Sin embargo, la investigación sobre la evaluación de riesgos del transporte intermodal es insuficiente y poco sistemática. Para analizar la aplicabilidad del modo de transporte, es necesario establecer un modelo intermodal de evaluación de riesgos VaRC intermodal y un método de solución con preferencia de riesgo adaptable.

Además, deben abordarse ciertos problemas en el desarrollo de la evaluación de riesgos del transporte de mercancías peligrosas, lo que puede lograrse teniendo en cuenta tres aspectos. Un aspecto es el análisis de la aplicación del transporte unimodal e intermodal. Basándonos en el estado de la investigación existente, observamos que después del año 2000, los investigadores creen generalmente que el riesgo del transporte ferroviario y del transporte intermodal es menor que el del transporte de materiales peligrosos por carretera. Sin embargo, esta conclusión no es universal debido a la dificultad de conseguir un transporte ferroviario puerta a puerta y a los mayores riesgos asociados al proceso de reconfiguración intermodal. Por lo tanto, el análisis de la aplicación de los sistemas de transporte unimodal e intermodal puede orientar la toma de decisiones de los departamentos gubernamentales y los operadores de transporte. Además, las ventajas de los distintos modos de transporte, como el bajo riesgo, el bajo coste, la alta flexibilidad y la alta fiabilidad, pueden combinarse para lograr la seguridad pública y mejorar la competencia del sistema. El segundo aspecto es la construcción del modelo de evaluación de riesgos para el transporte intermodal. La investigación existente sobre modelos de evaluación de riesgos en el transporte carece de una consideración sistemática del proceso de transporte intermodal. No obstante, el modelo VaRC presenta las características de flexibilidad, escalabilidad y autoadaptación a las preferencias de riesgo en comparación con otros modelos de evaluación de riesgos. Por tanto, ampliar el modelo al ámbito del transporte intermodal combinando las características de cada modo de transporte es una posible línea de investigación en el futuro. Además, teniendo en cuenta que el modelo es subaditivo, establecer un algoritmo de solución adecuado es una de las futuras líneas de investigación. El tercer aspecto es la mejora gradual de la red de transporte por carretera, que ha dado lugar a un sistema de transporte por carretera con una coordinación aparente de tiempo variable, espacio cambiante y tiempo-espacio, como los conductores, los vehículos, las carreteras y el medioambiente. Este complejo sistema de transporte genera incertidumbre en los métodos y modelos de evaluación de riesgos. Por lo tanto, el análisis de la incertidumbre puede ser un punto caliente de investigación en el futuro.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por la Fundación Nacional Natural de China (subvención n.º 52078461), el Programa clave de I+D Proyectos de la provincia de Zhejiang (Subvención n.º 2019C03098), y el Proyecto de Educación Cooperativa Industria-Universidad (Proyecto n.º 202002003002). Los autores agradecen a todos los miembros de equipo por sus valiosos aportes y sugerencias.

Bibliografía

- Ang, H.S., Briscoe, J., 1980. Development of a system risk methodology for single and multimodal transportation systems. *Accident Analysis & Prevention* 12 (2), 161.
- Abkowitz, M.D., Lepofsky, M., Cheng, P., 1992. Selecting criterio for designating hazardous materials highway routes. *Transportation Research Record* 1333, 30-35.
- Abkowitz, M.D., DeLorenzo, J.P., Duych, R., et al., 2001. Assessing the economic effect of incidents involving truck transport of hazardous materials. *Transportation Research Record* 1763, 125-129.
- Ak, R., Bahrami, M., Bozkaya, B., 2020. A time-based model and GIS framework for assessing hazardous materials transportation risk in urban areas. *Journal of Transport & Health* 19, 100943.
- Allen, D.J., Wolkstein, M., 1998. Transportation of hazardous wastes. *Process Safety Progress* 17 (1), 61-67.
- Alp, E., 1995. Risk-based transportation planning practice: overall methodology and a case example. *Information Systems and Operational Research* 33 (1), 4-19.
- Ambituuni, A., Amezaga, J.M., Werner, D., 2015. Risk assessment of petroleum product transportation by road: a framework for regulatory improvement. *Safety Science* 79, 324-335.
- Anderson, R.T., Barkan, C.P.L., 2004. Railroad accident rates for use in transportation risk analysis. *Transportation Research Record* 1863, 88-98.
- Bagheri, M., 2009. Risk analysis of stationary dangerous goods railway cars: a case study. *Journal of Transportation Security* 2, 77-89.
- Bagheri, M., Saccomanno, F., Chenouri, S., et al., 2011. Reducing the threat of in-transit derailments involving dangerous goods through effective placement along the train consist. *Accident Analysis & Prevention* 43 (3), 613-620.
- Bagheri, M., Verma, M., Verter, V., 2014. Transport mode selection for toxic gases: rail or road? *Risk Analysis* 34 (1), 168-186.
- Barkan, C., Treichel, T., Widell, G., 2000. Reducing hazardous materials releases from railroad tank car safety vents. *Transportation Research Record* 1707, 27-34.
- Barkan, C.P.L., Dick, C.T., Anderson, R., 2003. Railroad derailment factors affecting hazardous materials transportation risk. *Transportation Research Record* 1825, 64-74.
- Bianco, L., Caramia, M., Giordani, S., et al., 2013. Operations research models for global route planning in hazardous material transportation. En: *Handbook of OR/MS Models in Hazardous Materials Transportation*. Springer, Nueva York.
- Bonvicini, S., Antonioni, G., Morra, P., et al., 2015. Quantitative assessment of environmental risk due to accidental spills from onshore pipelines. *Process Safety and Environmental Protection* 93, 31-49.
- Bonvicini, S., Leonelli, P., Spadoni, G., 1998. Risk analysis of hazardous materials transportation: evaluating uncertainty by means of fuzzy logic. *Journal of Hazardous Materials* 62 (1), 59-74.
- Bonvicini, S., Spadoni, G., 2008. A hazmat multi-commodity routing model satisfying risk criteria: a case study. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 21 (4), 345-358.
- Boulmakoul, A., 2006. Fuzzy graphs modelling for HazMat telegeomonitoring. *European Journal of Operational Research* 175 (3), 1514-1525.

Boulmakoul, A., Laurini, R., Zeitouni, K., et al., 1997. Spatial decision support system for hazardous materials transportation planning in the mohammedia region. En: 8th IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems, Chania, 1997.

Brainard, J., Lovett, A., Parfitt, J., 1996. Assessing hazardous waste transport risks using a GIS. *International Journal of Geographical Information Systems* 10 (7), 831-849.

Brown, D.F., Dunn, W.E., 2007. Application of a quantitative risk assessment method to emergency response planning. *Computers & Operations Research* 34 (5), 1243-1265.

Bryant, D.L., Abkowitz, M.D., 2007. Development of a terrestrial chemical spill management system. *Journal of Hazardous Materials* 147 (1-2), 78-90.

Brzozowska, L., 2016. Computer simulation of impacts of a chlorine tanker truck accident. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 43, 107-122.

Bubbico, R., Di Cave, S., Mazzarotta, B., 2004a. Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a GIS approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17 (6), 483-488.

Bubbico, R., Di Cave, S., Mazzarotta, B., 2004b. Risk analysis for road and rail transport of hazardous materials: a simplified approach. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 17 (6), 477-482.

Bubbico, R., Ferrari, C., Mazzarotta, B., 2000. Risk analysis of LPG transport by road and rail. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 13 (1), 27-31.

Bubbico, R., Maschio, G., Mazzarotta, B., et al., 2006. Risk management of road and rail transport of hazardous materials in Sicily. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (1), 32-38.

Cassini, P., 1998. Road transportation of dangerous goods: quantitative risk assessment and route comparison. *Journal of Hazardous Materials* 61 (1-3), 133-138.

Chakrabarti, U.K., Parikh, J.K., 2011. Class-2 hazmat transportation consequence assessment on surrounding population. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 24 (6), 758-766.

Chakrabarti, U.K., Parikh, J.K., 2013. A societal risk study for transportation of class-3 hazmats. A case of Indian state highways. *Process Safety and Environmental Protection* 91 (4), 275-284.

Cheng, J., Verma, M., Verter, V., 2016. Impact of train-makeup on hazmat risk in a transport corridor. *Journal of Transportation Safety & Security* 9 (2), 167-194.

Clark, R.M., Besterfield-Sacre, M.E., 2009. A new approach to hazardous materials transportation risk analysis: decision modeling to identify critical variables. *Risk Analysis* 29 (3), 344-354.

Cordeiro, F.G., Bezerra, B.S., Peixoto, A.S.P., et al., 2016. Methodological aspects for modeling the environmental risk of transporting hazardous materials by road. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 44, 105-121.

Current, J., Ratick, S., 1995. A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials. *Location Science* 3 (3), 187-201.

Das, A., Gupta, A.K., Mazumder, T.N., 2012. A comprehensive risk assessment framework for offsite transportation of inflammable hazardous waste. *Journal of Hazardous Materials* 227-228, 88-96.

Davies, P.A., Lees, F.P., 1992. The assessment of major hazards: the road transport environment for conveyance of hazardous materials in Great Britain. *Journal of Hazardous Materials* 32 (1), 41-79.

Dennis, S.M., 1996. Estimating risk costs per unit of exposure for hazardous materials transported by rail. *Logistics and Transportation Review* 32 (4), 351-375.

Douligeris, C., Iakovou, E., Yudhbir, L., 1997. Maritime route risk analysis for hazardous materials transportation. *IFAC Proceedings* 30 (8), 563-568.

Dvorak, Z., Rehak, D., David, A., et al., 2020. Qualitative approach to environmental risk assessment in transport. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (15), 5494.

Erkut, E., 1995. On the credibility of the conditional risk model for routing hazardous materials. *Operations Research Letters* 18 (1), 49-52.

Erkut, E., Ingolfsson, A., 2000. Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning. *Transportation Science* 34 (2), 165-179.

Erkut, E., Ingolfsson, A., 2005. Transport risk models for hazardous materials: revisited. *Operations Research Letters* 33 (1), 81-89.

Erkut, E., Tjandra, S.A., Verter, V., 2007. Chapter 9: hazardous materials transportation. En: Barnhart, C., Laporte, G. (Eds.), *Handbooks in Operations Research and Management Science*. Elsevier, Amsterdam, 539-621.

Erkut, E., Verter, V., 1995. A framework for hazardous materials transport risk assessment. *Risk Analysis* 15 (5), 589-601.

Erkut, E., Verter, V., 1998. Modeling of transport risk for hazardous materials. *Operations Research* 46 (5), 625-642.

Fabiano, B., Currò, F., Palazzi, E., et al., 2002. A framework for risk assessment and decision-making strategies in dangerous Good transportation. *Journal of Hazardous Materials* 93 (1), 1-15.

Fabiano, B., Currò, F., Reverberi, A.P., et al., 2005. Dangerous Good transportation by road: from risk analysis to emergency planning. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 18 (4-6), 403-413.

Fabiano, B., Palazzi, E., 2010. HazMat transportation by heavy vehicles and road tunnels: a simplified modelling procedure to risk assessment and mitigation applied to an Italian case study. *International Journal of Heavy Vehicle Systems* 17 (3-4), 216-236.

Gheorghe, A.V., Birchmeier, J., Vamanu, D., et al., 2005.

Comprehensive risk assessment for rail transportation of dangerous goods: a validated platform for decision support. *Reliability Engineering & System Safety* 88 (3), 247-272.

Glickman, T.S., 1988. Benchmark estimates of release accident rates in hazardous materials transportation by rail and truck. *Transportation Research Record* 1193, 22-28.

Glickman, T.S., 1983. Rerouting railroad shipments of hazardous materials to avoid populated areas. *Accident Analysis & Prevention* 15 (5), 329-335.

Glickman, T.S., 1991. An expeditious risk assessment of the highway transportation of flammable liquids in bulk. *Transportation Science* 25 (2), 115-123.

Glickman, T.S., Erkut, E., 2007. Assessment of hazardous material risks for rail yard safety. *Safety Science* 45 (7), 813-822.

Glickman, T.S., Golding, D., 1991. For a few dollars more: public trust and the case for transporting nuclear waste in dedicated trains. *Review of Policy Research* 10 (4), 127-138.

Godoy, S.M., Cruz, A., Scenna, N.J., 2007. STRRAP system-A software for hazardous materials risk assessment and safe distances calculation. *Reliability Engineering & System Safety* 92 (7), 847-857.

Goerlandt, F., Montewka, J., 2015. A framework for risk analysis of maritime transportation systems: a case study for oil spill from tankers in a ship-ship collision. *Safety Science* 76, 42-66.

Goforth, E., Ezzeldin, M., El-Dakhkhni, W., et al., 2020. Network-of-networks framework for multimodal hazmat transportation risk mitigation: application to used nuclear fuel in Canada. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste* 24 (3), 4020016.

Goldberg, D.M., Hong, S., 2019. Minimizing the risks of highway transport of hazardous materials. *Sustainability* 11 (22), 1-10.

Gregory, R., Lichtenstein, S., 1994. A hint of risk: tradeoffs between quantitative and qualitative risk factors. *Risk Analysis* 14 (2), 199-206.

Haastrup, P., Brockhoff, L.H., 1991. Reliability of accident casehistories concerning hazardous chemicalsean analysis of uncertainty and quality aspects. *Journal of Hazardous Materials* 27 (3), 339-350.

Harwood, D.W., Viner, J.G., Russell, E.R., 1990. Truck accident rate model for hazardous materials routing. *Transportation Research Record* 1264, 12-23.

Harwood, D.W., Viner, J.G., Russell, E.R., 1993. Procedure for developing truck accident and release rates for hazmat routing. *Journal of Transportation Engineering* 119 (2), 189-199.

Hassan, C.R.C., Balasubramaniam, P.A.L., Raman, A.A.A., et al., 2009. Inclusion of human errors assessment in failure frequency analysissea case study for the transportation of ammonia by rail in Malaysia. *Process Safety Progress* 28 (1), 60-67.

Hobeika, A.G., Kim, S., Sethuraman, R., 1993. Characteristics of hazardous-material accidents in Pennsylvania. *Journal of Transportation Engineering* 119 (2), 226.

Holeczek, N., 2019. Hazardous materials truck transportation problems: a classification and state of the art literatura review. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 69, 305-328.

Hosseini, S.D., Verma, M., 2017. A value-at-risk (VaR) approach to routing rail hazmat shipments. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 54, 191-211.

Hosseini, S.D., Verma, M., 2018. Conditional value-at-risk (CVaR) methodology to optimal train configuration and routing of rail hazmat shipments. *Transportation Research Part B: Methodological* 110, 79-103.

Hsu, W.K., Huang, S.H., Tseng, W.J., 2016. Evaluating the risk of operational safety for dangerous goods in air-freightsea revised risk matrix based on fuzzy AHP. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 48, 235-247.

Huang, X., Wang, X., Pei, J., et al., 2018. Risk assessment of the areas along the highway due to hazardous material transportation accidents. *Natural Hazards* 93 (3), 1181-1202.

Hwang, S.T., Brown, D.F., O'Steen, J.K., et al., 2001. Risk assessment for national transportation of selected hazardous materials. *Transportation Research Record* 1763, 114-124.

Jia, H., Zhang, L., Lou, X., et al., 2011. A fuzzy-stochastic constraint programming model for hazmat road transportation considering terrorism attacking. *Systems Engineering Procedia* 1, 130-136.

Jin, H., Batta, R., 1997. Objectives derived form viewing hazmat shipments as a sequence of independent Bernoulli trials. *Transportation Science* 31 (3), 252-261.

Kang, Y., Batta, R., Kwon, C., 2013. Value-at-risk model for hazardous material transportation. *Annals of Operations Research* 222, 361-387.

- Kara, B.Y., Erkut, E., Verter, V., 2003. Accurate calculation of hazardous materials transport risks. *Operations Research Letters* 31 (4), 285-292.
- Karkazis, J., Boffey, T.B., 1995. Optimal location of routes for vehicles transporting hazardous materials. *European Journal of Operational Research* 86 (2), 201-215.
- Ke, G., Zhang, H., Bookbinder, J.H., 2020. A dual toll policy for maintaining risk equity in hazardous materials transportation with fuzzy incident rate. *International Journal of Production Economics* 227, 107650.
- Kheirkhah, A., Esmailzadeh, A., Ghazinoory, S., 2009. Developing strategies to reduce the risk of hazardous materials transportation in Iran using the method of fuzzy SWOT analysis. *Transport* 24 (4), 325-332.
- Klein, C.M., 1991. A model for the transportation of hazardous waste. *Decision Sciences* 22 (5), 1091-1108.
- Kornhauser, A., Pasternak, D., Sontag, M., 1994. Comparing risks of transporting chemicals by highway and rail: a case study. *Transportation Research Record* 1430, 36-40.
- Kwon, C., 2011. Conditional value-at-risk model for hazardous materials transportation. En: *The 2011 Winter Simulation Conference*, Phoenix, 2011.
- LaFrance-Linden, D., Watson, S., Haines, M.J., 2001. Threat assessment of hazardous materials transportation in aircraft cargo compartments. *Transportation Research Record* 1763, 130-137.
- Landucci, G., Antonioni, G., Tugnoli, A., et al., 2017. HazMat transportation risk assessment: a revisitacion in the perspective of the Viareggio LPG accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 49 (part A), 36-46.
- Leal Junior, I.C., D'Agosto, M.d.A., 2011. Modal choice for transportation of hazardous materials: the case of land modes of transport of bio-ethanol in Brazil. *Journal of Cleaner Production* 19 (2-3), 229-240.
- Leeming, D.G., Saccomanno, F.F., 1994. Use of quantified risk assessment in evaluating the risks of transporting chlorine by road and rail. *Transportation Research Record* 1430, 27-35.
- Leonelli, P., Bonvicini, S., Spadoni, G., 1999. New detailed numerical procedures for calculating risk measures in hazardous materials transportation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 12 (6), 507-515.
- Leonelli, P., Bonvicini, S., Spadoni, G., 2000. Hazardous materials transportation: a risk-analysis-based routing methodology. *Journal of Hazardous Materials* 71 (1-3), 283-300.
- Lepofsky, M., Abkowitz, M., Cheng, P., 1993. Transportation hazard analysis in integrated GIS environment. *Journal of Transportation Engineering* 119 (2), 115-131.
- Li, R., Leung, Y., 2011. Multi-objective route planning for dangerous goods using compromise programming. *Journal of Geographical Systems* 13, 249-271.
- Li, Y., Xu, D., Shuai, J., 2020. Real-time risk analysis of road tanker containing flammable liquid based on fuzzy Bayesian network. *Process Safety and Environmental Protection* 134, 36-46.
- List, G.F., Mirchandani, P.B., Turnquist, M.A., et al., 1991. Modeling and analysis for hazardous materials transportation: risk analysis, routing/scheduling and facility location. *Transportation Science* 25 (2), 100-174.
- Liu, X., Saat, M.R., Barkan, C.P.L., 2013. Safety effectiveness of integrated risk reduction strategies for rail transport of hazardous materials. *Transportation Research Record* 2374, 102-110.
- Liu, X., Saat, M.R., Barkan, C.P.L., 2014. Probability analysis of multiple-tank-car release incidents in railway hazardous materials transportation. *Journal of Hazardous Materials* 276, 442-451.

- Lovett, A.A., Parfitt, J.P., Brainard, J.S., 1997. Using GIS in risk analysis: a case study of hazardous waste transport. *Risk Analysis* 17 (5), 625-633.
- Loza-Hernandez, L., Gendreau, M., 2020. A framework for assessing hazmat risk at nodes of transport networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 50, 101854.
- Luo, D., Liao, C., Yu, X., 2019. 2013-2017 statistics and preventive measures of hazardous chemicals transportation accidents in China. *China Public Security (Academy Edition)* 1, 28-32.
- Ma, L., Li, Y., Liang, L., et al., 2013. A novel method of quantitative risk assessment based on grid difference of pipeline sections. *Safety Science* 59, 219-226.
- MacGregor, D., Slovic, P., Mason, R.G., et al., 1994. Perceived risks of radioactive waste transport through Oregon: results of a statewide survey. *Risk Analysis* 14 (1), 5-14.
- Machado, E.R., Valle Júnior, R.F.D., Sanches Fernandes, L.F., et al., 2018. The vulnerability of the environment to spills of dangerous substances on highways: a diagnosis based on multi criteria modeling. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 62, 748-759.
- Marseguerra, M., Zio, E., Bianchi, M., 2004. A fuzzy modeling approach to road transport with application to a case of spent nuclear fuel transport. *Nuclear Technology* 146 (3), 290-302.
- Martínez-Alegría, R., Ordóñez, C., Taboada, J., 2003. A conceptual model for analyzing the risks involved in the transportation of hazardous goods: implementation in a geographic information system. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 9 (3), 857-873.
- Mazzarotta, B., 2002. Risk reduction when transporting dangerous goods: road or rail? *Risk, Decision and Policy* 7 (1), 45-56.
- Milazzo, M.F., Lisi, R., Maschio, G., et al., 2002. HazMat transport through Messina town: from risk analysis suggestions for improving territorial safety. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15 (5), 347-356.
- Milazzo, M.F., Lisi, R., Maschio, G., et al., 2010. A study of land transport of dangerous substances in Eastern Sicily. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 23 (3), 393-403.
- Montiel, H., Vílchez, J.A., Arnaldos, J., et al., 1996. Historical analysis of accidents in the transportation of natural gas. *Journal of Hazardous Materials* 51 (1-3), 77-92.
- Niu, S., Ukkusuri, S.V., 2020. Risk assessment of commercial dangerous-goods truck drivers using geo-location data: a case study in China. *Accident Analysis & Prevention* 137, 105427.
- Oggero, A., Darbra, R.M., Muñoz, M., et al., 2006. A survey of accidents occurring during the transport of hazardous substances by road and rail. *Journal of Hazardous Materials* 133 (1-3), 1-7.
- Oturakci, M., Dagsuyu, C., 2020. Integrated environmental risk assessment approach for transportation modes. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 26 (2), 384-393.
- Ovidi, F., Van der Vlies, V., Kuipers, S., et al., 2020. HazMat transportation safety assessment: analysis of a "viareggiolike" incident in The Netherlands. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 63, 103985.
- Paltrinieri, N., Landucci, G., Molag, M., et al., 2009. Risk reduction in road and rail LPG transportation by passive fire protection. *Journal of Hazardous Materials* 167 (1-3), 332-344.
- Pamucar, D., Ljubojevic, S., Kostadinovic, D., et al., 2016. Cost and risk aggregation in multi-objective route planning for hazardous materials transportation—a neuro-fuzzy and artificial bee colony approach. *Expert Systems with Applications* 65, 1-15.
- Patel, M.H., Horowitz, A.J., 1994. Optimal routing of hazardous materials considering risk of spill. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 28 (2), 119-132.

- Pet-Armacost, J.J., Sepulveda, J., Sakude, M., 1999. Monte Carlo sensitivity analysis of unknown parameters in hazardous materials transportation risk assessment. *Risk Analysis* 19 (6), 1173-1184.
- Pine, J.C., Marx, B.D., 1997. Utilizing state hazardous materials transportation data in hazardous analysis. *Journal of Hazardous Materials* 54 (1-2), 113-122.
- Purdy, G., 1993. Risk analysis of the transportation of dangerous goods by road and rail. *Journal of Hazardous Materials* 33 (2), 229-259.
- Qu, X., Meng, Q., Li, S., 2011. Ship collision risk assessment for the Singapore strait. *Accident Analysis & Prevention* 43 (6), 2030-2036.
- Raj, P., Pritchard, E., 2000. Hazardous materials transportation on U.S. railroads: application of risk analysis methods to decision making in development of regulations. *Transportation Research Record* 1707, 22-26.
- Reniers, G.L.L., Dullaert, W., 2013. A method to assess multimodal Hazmat transport security vulnerabilities: hazmat transport SVA. *Transport Policy* 28, 103-113.
- Reniers, G.L.L., Jongh, K.D., Gorrens, B., et al., 2010. Transportation risk analysis tool for hazardous substances (TRAN)ea user-friendly, semi-quantitative multi-mode hazmat transport route safety risk estimation methodology for Flanders. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15 (8), 489-496.
- ReVelle, C., Cohon, J., Shobrys, D., 1991. Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes. *Transportation Science* 25 (2), 99-174.
- Rhyne, W., 1994. *Hazardous Materials Transportation Risk Analysis Quantitative Approaches for Truck and Train*. Van Norstrand Reinhold, Nueva York.
- Roeleven, D., Kokc, M., Stipdonk, H.I., et al., 1995. Inland waterway transport: modelling the probability of accidents. *Safety Science* 19 (2-3), 191-202.
- Ronza, A., Vílchez, J.A., Casal, J., 2007. Using transportation accident databases to investigate ignition and explosi3n probabilities of flammable spills. *Journal of Hazardous Materials* 146 (1-2), 106-123.
- Saat, M.R., Werth, C.J., Schaeffer, D., et al., 2014. Environmental risk analysis of hazardous material rail transportation. *Journal of Hazardous Materials* 264, 560-569.
- Sacomanno, F.F., Chan, A.Y.W., 1985. Economic evaluation of routing strategies for hazardous road shipments. *Transportation Research Record* 1020, 12-18.
- Sacomanno, F.F., El-Hage, S., 1989. Minimizing derailments of railcars carrying dangerous commodities through effective marshaling strategies. *Transportation Research Record* 1245, 34-51.
- Sacomanno, F.F., Shortreed, J.H., 1993. Hazmat transport risks: societal and individual perspectives. *Journal of Transportation Engineering* 119 (2), 177-188.
- Sacomanno, F.F., Shortreed, J.H., Aerde, M., et al., 1990. Comparison of risk measures for the transport of dangerous commodities by truck and rail. *Transportation Research Record* 1245, 1-13.
- Sarykalin, S., Serraino, G., Uryasev, S., 2008. Value-at-risk vs conditional value-at-risk in risk management and optimization. *INFORMS Tutorials in Operations Research*, <https://doi.org/10.1287/educ.1080.0052>.
- Sattayaprasert, W., Hanaoka, S., Taneerananon, P., et al., 2008. Creating a risk-based network for hazmat logistics by route prioritization with ahp: case study: gasoline logistics in Rayong, Thailand. *IATSS Research* 32 (1), 74-87.
- Scenna, N.J., Santa Cruz, A.S.M., 2005. Road risk analysis due to them transportation on of chlorine in Rosario city. *Reliability Engineering & System Safety* 90 (1), 83-90.

- Schwarz, G., 1995. Transports of radioactive materials-transport methods and transport safety. *Atw-Internationale Zeitschrift Fur Kernenergie* 40 (7), 466-470.
- Schweitzer, L., 2006. Environmental justice and hazmat transport: a spatial analysis in southern California. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 11 (6), 408-421.
- Shen, X., Yan, Y., Li, X., et al., 2014. Analysis on tank truck accidents involved in road hazardous materials transportation in China. *Traffic Injury Prevention* 15 (7), 762-768.
- Sivakumar, R.A., Batta, R., Karwan, M.H., 1993. A network-based model for transporting extremely hazardous materials. *Operations Research Letters* 13 (2), 85-93.
- Sivakumar, R.A., Batta, R., Karwan, M.H., 1995. A multiple route conditional risk model for transporting hazardous materials. *Information Systems and Operational Research* 33 (1), 20-33.
- Soares, J., Fernandes, R., Brito, D., et al., 2020. Environmental risk assessment of accidental marine spills: a new approach combining an online dynamic hazardous and noxious substances database with numerical dispersion, risk and population modelling. *Science of The Total Environment* 715, 136801.
- Tena-Chollet, F., Tixier, J., Dusserre, G., et al., 2013. Development of a spatial risk assessment tool for the transportation of hydrocarbons: methodology and implementation in a geographical information system. *Environmental Modelling & Software* 46, 61-74.
- Thierheimer, W., Tane, N., Gruia, R., et al., 2010. Risk arising from transport activities. *Environmental Engineering and Management Journal* 9 (12), 1667-1670.
- Tinoco, M.A.C., Nodari, C.T., Pereira, K.R.D., 2016. Environmental, social, and roadway vulnerability in accidents involving transportation of hazardous products: a case study of the BR-101 highway between Osorio and Torres in Rio Grande do Sul State, Brazil. *Cadernos De Saude Publica* 32 (9), e00112815.
- Torretta, V., Raboni, M., Copelli, S., et al., 2013. Application of a decision support system to the transport of hazardous materials. *Environmental Engineering and Management Journal* 12 (10), 2031-2039.
- Vaidogas, E.R., Linkute, L., Stulgys, D., 2012a. Simulation-based predicting the position of road tank explosions. Part I: data and models. *Transport* 27 (1), 14-24.
- Vaidogas, E.R., Linkute, L., Stulgys, D., 2012b. Simulation-based predicting the position of road tank explosions. Part II: a case study. *Transport* 27 (2), 118-128.
- Van der Vlies, A.V., Suddle, S.I., 2008. Structural measures for a safer transport of hazardous materials by rail: the case of the basic network in The Netherlands. *Safety Science* 46 (1), 119-131.
- Van Dorp, J.R., Merrick, J.R.W., 2011. On a risk management analysis of oil spill risk using maritime transportation system simulation. *Annals of Operations Research* 187, 249-277.
- Van Hengel, W., Kruitwagen, P.G., 1994. Environmental risks of inland water transport. *Water Science and Technology* 29 (3), 173-179.
- Van Raemdonck, K., Macharis, C., Mairesse, O., 2013. Risk analysis system for the transport of hazardous materials. *Journal of Safety Research* 45, 55-63.
- Verma, M., 2011. Railroad transportation of dangerous goods: a conditional exposure approach to minimize transport risk. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19 (5), 790-802.
- Verma, M., 2012. A fixed-penalty cost and expected consequence approach to planning and managing inter-modal transportation of heterogeneous freight. *AIMS International Journal of Management* 6, 101-118.
- Verma, M., Verter, V., 2007. Railroad transportation of dangerous goods: population exposure to airborne to-

xins. *Computers & Operations Research* 34 (5), 1287-1303.

Verma, M., Verter, V., 2010. A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods. *European Journal of Operational Research* 202 (3), 696-706.

Verma, M., Verter, V., Zufferey, N., 2012. A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 48 (1), 132-149.

Verter, V., Kara, B.Y., 2001. A GIS-based framework for hazardous materials transport risk assessment. *Risk Analysis* 21 (6), 1109-1120.

Vianello, C., Maschio, G., 2014. Quantitative risk assessment of the Italian gas distribution network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 32, 5-17.

Viñchez, J.A., Sevilla, S., Montiel, H., et al., 1995. Historical análisis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 8 (2), 87-96.

Wang, J.S., Kang, Y.Y., Kwon, C., et al., 2012. Dual toll pricing for hazardous materials transport with linear delay. *Networks and Spatial Economics* 12 (1), 147-165.

Wang, X., Zhu, J., Ma, F., et al., 2016. Bayesian network-based risk assessment for hazmat transportation on the middle route of the south-to-north water transfer project in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 30, 841-857.

Webster, J., Watson, R.T., 2002. Analyzing the past to prepare for the future: writing a literature review. *Mis Quarterly* 26 (2), XIII-XXIII.

Weigkricht, E., Fedra, K., 1995. Decision-support systems for dangerous goods transportation. *INFOR* 33 (2), 84-99.

Xie, Y., Lu, W., Wang, W., et al., 2012. A multimodal location and routing model for hazardous materials transportation. *Journal of Hazardous Materials* 227-228, 135-141.

Yang, J., Li, F., Zhou, J.B., et al., 2010. A survey on hazardous materials accidents during road transport in China from 2000 to 2008. *Journal of Hazardous Materials* 184 (1-3), 647-653.

Zhang, J., Hodgson, J., Erkut, E., 2000. Using GIS to assess the risks of hazardous materials transport in networks. *European Journal of Operational Research* 121 (2), 316-329.

Zhao, J., Ke, G., 2017. Incorporating inventory risks in locationrouting models for explosive waste management. *International Journal of Production Economics* 193, 123-136.

Zhao, J., Verter, V., 2015. A bi-objective model for the used oil location-routing problem. *Computers & Operations Research* 62, 157-168.

Zhao, J.H., Ke, G., 2019. Optimizing emergency logistics for the offsite hazardous waste management. *Journal of Systems Science and Systems Engineering* 28, 747-765.

Zhao, J., Verma, M., Verter, V., 2020. Pipeline transportation of crude oil in Canada: environmental risk assessment using modified diffusion models. *Human and Ecological Risk Assessment* 27 (5), 1206-1226.

DOSSIER

Vagones cisterna para transporte de metanol en vías argentinas y normativa de seguridad

Tank wagons for methanol transport on Argentinean roads and safety standards

Rafael Gustavo Galeano

Ingeniero Mecánico (UNLP)
e Ing. Ferroviario (UBA).
Especializado en el Transporte
de Mercancías Peligrosas
por Ferrocarril e Higiene y
Seguridad en el Trabajo.

rgaleano176@gmail.com

Palabras clave: Vagones
Cisterna, Seguridad
Operacional, Metanol,
Normativa, Transporte
Ferroviario

Keywords: Tank Cars, Safety,
Methanol, Regulations, Rail
Transport

Recibido: 03/07/24

Aceptado: 10/07/24

Resumen

El artículo detalla las inspecciones realizadas a los vagones cisterna de Ferrosur Roca S.A., adaptados para el transporte de metanol en Argentina, siguiendo protocolos de la CNRT. Se evaluaron aspectos técnicos y de seguridad, como bogies, sistemas de freno y dispositivos de choque y tracción. También se verificaron certificados de habilitación y cumplimiento de normas internacionales como RID y Mercosur. Estas inspecciones garantizan la integridad estructural y la seguridad operativa, minimizando riesgos ambientales y de salud pública. Además, se resalta la importancia del mantenimiento y la revisión regular de los vagones para prevenir incidentes y asegurar la confianza pública en el transporte ferroviario.

Abstract

The article details the inspections carried out on Ferrosur Roca S.A.'s tank wagons, adapted for methanol transport in Argentina, following CNRT protocols. Technical and safety aspects were evaluated, such as bogies, braking systems and crash and traction devices. Certificates of qualification and compliance with international standards such as RID and Mercosur were also verified. These inspections guarantee structural integrity and operational safety, minimising environmental and public health risks. In addition, the importance of regular maintenance and overhaul of wagons is highlighted to prevent incidents and ensure public confidence in rail transport.

Introducción

En el contexto del transporte de mercancías peligrosas como el metanol, la seguridad y el cumplimiento de normativas son aspectos fundamentales. Este artículo presenta algunos de los resultados de las inspecciones realizadas por el autor del trabajo, solicitadas por la Municipalidad de Quilmes, enfocándose en la revisión de vagones cisterna destinados al transporte de metanol en vías argentinas. Dichas revisiones se llevaron a cabo con base en los protocolos establecidos por la Comisión Nacional de Regulación del Transporte (CNRT).

La importancia de estas pericias radica en garantizar la integridad de las operaciones, protegiendo al personal involucrado, al medioambiente y a la población en general. Las actividades incluyeron la evaluación de vagones cisterna dispuestos por Ferrosur Roca S.A. en la playa de maniobras de Neuquén el 3 de marzo de 2004, y la verificación de los protocolos de ensayo de cisternas presentados por la misma empresa ante la CNRT.

Se entiende por mercancías peligrosas a aquellos productos que, aunque imprescindibles para la vida moderna, presentan riesgos para la salud humana, los bienes materiales o el medioambiente. La revisión de vagones que transportan este tipo de mercancías resulta crucial para la seguridad operacional ferroviaria, ya que pueden contener sustancias inflamables, tóxicas o corrosivas. Por ello, es esencial realizar controles rigurosos y regulares para identificar y mitigar posibles fallas antes de que puedan causar incidentes o accidentes graves.

Los controles periódicos permiten detectar problemas estructurales, como grietas en la cisterna, desgaste en los bogies y ruedas, y deficiencias en los sistemas de freno y suspensión. La identificación temprana de estos peligros no solo previene accidentes, sino que también evita el incumplimiento de normativas y estándares internacionales, como el Acuerdo Mercosur y las normas RID (Reglamento Internacional para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril)¹.

Además, estas evaluaciones verifican los sistemas de contención específicos de los vagones, como las válvulas de seguridad, elementos antiimpacto y dispositivos de puesta a tierra, diseñados para minimizar riesgos durante el transporte y las operaciones de carga y descarga. Estos procedimientos aseguran que las empresas ferroviarias demuestren su compromiso con la seguridad y la protección del entorno, manteniendo la confianza pública en el sistema de transporte ferroviario.

Figura 1. Fotografía de un vagón cisterna de la empresa Ferrosur Roca



Fuente: elaboración propia

¹ El RID es la norma legal y esencial que regula el transporte internacional de mercancías peligrosas por ferrocarril, y que además se aplica al transporte nacional en los países de la Unión Europea, con objeto de armonizar las condiciones del transporte de mercancías peligrosas, garantizando su adecuado funcionamiento.

Características técnicas y de seguridad de los vagones cisterna adaptados para el transporte de metanol

En marzo de 2004, se inspeccionó en la base de Neuquén un parque de 147 vagones cisterna con capacidades individuales de carga de 40, 50 y 60 m³, adaptados para el transporte de metanol (Código ONU 1230). Durante el proceso, se analizaron los certificados habilitantes, las especificaciones, las normas y los procedimientos de reparación junto a los planos, esquemas y registros fotográficos.

Cada vagón cisterna destinado al transporte de metanol debe cumplir con los estándares de seguridad establecidos por la legislación vigente en sus componentes principales: bogies, estructura portante y cisterna. Durante las inspecciones, se observó que los bogies de rodamiento de los vagones cisterna tenían una estructura propia que incluía el sistema de suspensión y las cuatro ruedas para movilizarse a lo largo de las vías férreas. La estructura portante consistía en un bastidor de acero, un sistema automático de freno de aire comprimido, un sistema de freno manual y dispositivos de choque y tracción.

Además, dicha estructura contenía dos cunas de acero con láminas de plomo donde se apoyaba la cisterna, zunchos de amarre y placas de acero soldadas que unían la cisterna a la estructura. Estos elementos son colocados normalmente para evitar el desplazamiento vertical y horizontal de los componentes fundamentales de los vagones.

Figura 2. Acople carga y descarga para retorno de gases



Fuente: Ferrosur Rosa SA

Figura 3. Acople sensor de nivel, puesta a tierra y dispositivo para válvula ventral



Fuente: Ferrosur Roca SA

Figura 4. Caja de seguridad para protección de manija de accionamiento



Fuente: Ferrosur Roca SA

Cada cisterna estaba construida con chapas de acero unidas por soldadura eléctrica. Tanto las chapas que conformaban su envoltorio como las de sus cabezales tenían espesores mayores a 7 mm, en cumplimiento del Reglamento Internacional para el Transporte de Mercancías Peligrosas por Ferrocarril (RID) de la Unión Europea y el Acuerdo del Mercosur para el transporte de este tipo de producto.

La parte superior central de cada cisterna contaba con un domo, sobre el cual se había instalado una nueva entrada de hombre y diversos accesorios protegidos contra impactos y vuelcos por una virola de seguridad. Entre los accesorios se encontraba la entrada de hombre con válvula de sobrepresión y vacío, la escotilla de inspección con cierre a presión, la válvula de retorno que permite la salida de vapores del producto durante la carga o la compensación de la depresión en la descarga, el protector de la válvula de retorno y, finalmente, el sensor óptico de nivel que proporciona información sobre el grado de llenado de la cisterna.

Alrededor del domo se encontraba una plataforma de seguridad construida con perfiles de acero y cubierta de metal desplegado antideslizante, desde la cual los operadores podían acceder de manera segura al equipamiento ubicado en el interior de la virola. Para acceder a esta plataforma, se disponían dos escaleras metálicas antideslizantes a cada lado de la cisterna.

En la parte inferior central de la cisterna y el bastidor se localizaban los elementos y accesorios necesarios para la carga, el transporte y la descarga de materiales peligrosos líquidos, todos protegidos con jaulas antiimpacto.

Figura 5. Escotilla con tapa de inspección cerrada, sensor de nivel y recuperación de gases



Fuente: Ferrosur Roca SA

Figura 6. Escotilla con tapa de inspección abierta donde se observa la válvula de seguridad en la tapa



Fuente: Ferrosur Roca SA

Figura 7. Accionamiento para apertura de tapa de inspección



Fuente: Ferrosur Roca SA

El proceso de carga y descarga era del tipo ventral (bottom loading), uno de los más seguros para el manejo de productos peligrosos, como se explica en el siguiente apartado.

Válvula ventral de seguridad (VVS)

En el marco de las pericias, se constató que la VVS (válvula ventral de seguridad) estaba instalada en el fondo de cada cisterna mediante una brida de fijación en un alojamiento especialmente diseñado. Esta válvula permanece herméticamente cerrada desde la carga hasta la operación de descarga. Además, su diseño incluye una sección fusible que predetermina la posible fractura en caso de accidentes, manteniendo el cierre hermético de la válvula para evitar el derrame de material peligroso, incluso después de un posible accidente.

Inmediatamente debajo de la VVS, se encontraba un amortiguador antivibratorio, construido con un fuelle de acero inoxidable soldado sobre bridas de acero al carbono. Este dispositivo está diseñado para evitar la transmisión de vibraciones a la válvula ventral durante el transporte. Bajo el amortiguador antivibratorio, se observó el acoplamiento del ramal T, construido con un tubo de acero especial de 4 pulgadas, dispuesto transversalmente y sujeto a la estructura del bastidor mediante abrazaderas.

En uno de los extremos del ramal T se localizaba un acople especial de 4 pulgadas para la carga y descarga del producto peligroso. Este acople evita derrames, ya que actúa como una válvula que se habilita únicamente cuando

la pieza hembra de la manguera correspondiente a la instalación fija se conecta correctamente. La válvula o acople contenía una tapa de seguridad.

El accionamiento de la VVS se realiza mediante un dispositivo instalado sobre el bastidor, dentro de una caja de protección en una posición cómoda y segura para su operación. Al mover una palanca del dispositivo, se acciona un cable de acero que desplaza el brazo lateral de la válvula, venciendo el resorte que empuja el obturador de la VVS. Esta válvula estaba enclavada con la válvula de retorno (VR) y se accionaban simultáneamente mediante un vástago que las vinculaba.

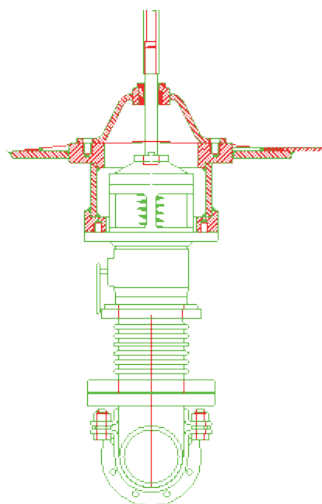
Durante la carga, el producto ingresa por la parte más baja de la cisterna, desplazando los gases y vapores hacia la VR. En las pericias se observó que esta válvula estaba conectada a una cañería de 3 pulgadas que terminaba en un acople rápido. A su vez, este acople se conectaba mediante mangueras herméticas a la instalación fija que recibe los gases, evitando en todo momento que el producto y sus vapores entraran en contacto con la atmósfera y la contaminaran.

Figura 8. VVS y amortiguador antivibratorio



Fuente: Ferrosur Roca SA

Figura 9. Detalle de la VVS



Fuente: Ferrosur Roca SA

Los vagones inspeccionados también contaban con un conector para la puesta a tierra, que descarga la electricidad estática del vagón. El sistema operativo para el llenado y vaciado del vagón tenía un enclavamiento que impedía la carga o descarga si el equipo no estaba conectado a tierra². Además, los rodantes estaban equipados con un sensor óptico de nivel que, conectado al sistema fijo, controlaba la operación de carga y descarga, evitando derrames innecesarios por exceso de llenado.

Normativas de seguridad de los vagones cisterna

El material rodante involucrado en el transporte de mercancías peligrosas debe cumplir con disposiciones legales aplicables en los contratos de concesión del servicio público ferroviario de carga. En este contexto, el Decreto N.º 1141/91 establece una serie de requisitos específicos que deben cumplirse, incluyendo lo siguiente:

Ningún material rodante podrá ser librado al servicio público sin el previo reconocimiento y certificado habilitante, el cual deberá ser otorgado por el concesionario del servicio público por medio de un representante técnico designado conforme a los procedimientos derivados de la Ley de Ejercicio Profesional de la Ingeniería. Cuando, por la reparación general o deterioro grave, se retirase del servicio público algún material rodante, no podrá restituirse al servicio sin nuevo reconocimiento y autorización. (Decreto N.º 1141/91, art. 3)

El decreto también indica lo siguiente:

Todo material rodante en servicio deberá estar provisto del certificado de habilitación firmado por el representante técnico de la empresa concesionaria. Dicho certificado será colocado en lugar visible y en él se hará constar que ha sido sometido a los ensayos periódicos reglamentarios. (art. 3)

Todos los vagones cisterna inspeccionados y adaptados para el transporte de metanol contaban con un certificado de habilitación. A su vez, habían sido sometidos a reparación tipo B, según la especificación FAT V-2038 emitida en marzo de 1984 por el área técnica de Ferrocarriles Argentinos (FAT) para vagones, la cual sigue vigente hasta la fecha. Esta reparación implica un proceso profundo en taller, donde se intervienen todas y cada una de las partes del vagón.

Figura 10. Estructura seguridad encima del tanque



Fuente: Centro Argentino de Ingenieros

² La puesta a tierra implica toda la ligazón metálica directa, sin fusibles ni protección, de sección suficiente entre ciertos componentes o partes de una instalación y un electrodo o grupo de electrodos enterrados en el suelo. Su propósito es evitar diferencias potenciales peligrosas en la instalación y, al mismo tiempo, permitir el paso a tierra de corrientes de falla o de descarga atmosférica.

Controles y revisiones efectuadas a los vagones cisterna

La especificación técnica establece la secuencia y oportunidad de las operaciones de reparación o mantenimiento, la metodología de dichas operaciones, así como los documentos técnicos que rigen su control de calidad, las condiciones de inspección y de su nueva puesta en servicio.

En los vagones cisterna evaluados, la reparación tipo B implicó la intervención de varios componentes. Se realizaron trabajos en los bogies, los pares montados, la estructura portante, los sistemas de choque, tracción, freno manual y neumático, así como en la misma cisterna. Además, se instalaron nuevos equipos, accesorios y protecciones relacionados con los sistemas de carga, descarga, recuperación de gases, puesta a tierra, control de nivel de producto y plataforma de seguridad.

De acuerdo con la normativa vigente, la documentación consultada y la inspección realizada a los vagones cisterna, se pueden mencionar los diferentes controles y las revisiones que se efectuaron en materia de seguridad:

- Los bogies fueron revisados y reparados con los procedimientos que se establecen en la especificación FAT V 2006 (Norma Técnica de Ferrocarriles Argentinos).
- El bastidor recibió un control de los componentes estructurales y se repararon todas las partes deformadas o debilitadas.
- El sistema de tracción y choque se reparó de acuerdo con la especificación FAT V 2004 (Norma Técnica de Ferrocarriles Argentinos).
- El sistema de freno automático de aire comprimido se reparó y probó de acuerdo con lo que determina la especificación FAT V 1409 (Norma Técnica de Ferrocarriles Argentinos). En todos los casos se utilizan zapatas de freno de composición antichispas con bajo coeficiente de fricción tipo NC 110 (especificación del fabricante).
- Las soldaduras de la cisterna sufrieron controles visuales y radiográficos de acuerdo con procedimientos de calidad. Las soldaduras fueron realizadas por personal calificado según el procedimiento RP 117 (soldadores calificados).
- A la cisterna se le controlaron los espesores de envoltente y cabezales para determinar que el grosor de las láminas no esté por debajo de los 7 mm.
- Se le realizó la prueba de estanqueidad hidrostática normalizada para detectar posibles escapes. Además, se realizaron pruebas de funcionamiento en vacío y con agua para comprobar el perfecto funcionamiento de las válvulas y los conectores.
- Adicionalmente, se observó que, aunque no lo exigen las reglamentaciones, las cisternas fueron pintadas de color blanco a fin de disminuir la absorción del calor solar.
- Cada cisterna cuenta con señalización de seguridad para la intervención segura de bomberos ante emergencias. Así, en cada lateral y en extremos opuestos se halló pintado el rombo de seguridad reglamentario que identifica al metanol como líquido inflamable (3). Además, se observó el rectángulo, ubicado cerca del rombo, que indica el número identificador de las Naciones Unidas (1230) de la sustancia y el número de riesgo (48) correspondiente.
- Cada vehículo cuenta con franjas reflectivas laterales de seguridad para ser visualizado en los pasos a nivel por los móviles carreteros.

Figura 11. Simbología de seguridad



Fuente: SOLVAY S.A.I.C.

Conclusiones

El mantenimiento adecuado de los vagones cisterna utilizados en el transporte de mercancías peligrosas resulta crucial para garantizar la seguridad operacional y la integridad del sistema de transporte. Según las Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas de Naciones Unidas, el mantenimiento regular y sistemático de estos vehículos previene accidentes y minimiza los riesgos asociados. Esto incluye inspecciones periódicas, reparaciones oportunas y el cumplimiento estricto de normativas técnicas y de seguridad. Un mantenimiento adecuado no solo asegura el funcionamiento óptimo de los equipos y la prevención de fugas o deterioros que puedan comprometer la seguridad, sino que también contribuye a la protección del medioambiente y la seguridad pública durante todo el ciclo de transporte de mercancías peligrosas (Naciones Unidas, 2009).

Las pericias del parque de Ferrosur Roca S.A. concluyeron que cada uno de los componentes de los vagones cisterna inspeccionados fue intervenido en taller bajo una reparación tipo B, lo que los habilita para su uso. Se realizó el mantenimiento adecuado, con una duración de 6 años o 150.000 kilómetros, según las especificaciones, normas y procedimientos FAT emitidos por el área técnica de la Gerencia de Mecánica de Ferrocarriles Argentinos, vigentes a la fecha.

Todos los vagones cisterna contaban con un certificado habilitante, conforme a lo establecido por el Poder Ejecutivo Nacional mediante el Decreto N.° 1141/91. Además, estos vehículos cumplían con el Acuerdo Mercosur (equivalente a la normativa europea RID) para el transporte ferroviario de materiales peligrosos, incluido el metanol.

Estas medidas son fundamentales para asegurar la integridad estructural, la operatividad segura y el cumplimiento normativo en el transporte ferroviario, protegiendo así al personal involucrado, a las comunidades cercanas a las vías y al medioambiente.

Bibliografía

U.S. Department of Transportation (1998). Track safety standards (Title 49, Part 213, Code of Federal Regulations). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

U.S. Department of Transportation (1998). Carriage by rail (Title 49, Part 174, Code of Federal Regulations). Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.

Organización de la Naciones Unidas (2009). Recomendaciones relativas al Transporte de Mercancías Peligrosas. Reglamentación Modelo (ST/SG/AC.10/1/Rev.16, Vol. I). Disponible en: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/dpma_lista_producto.pdf

Normativa

Decreto N.º 1.141 de 1991 (Argentina). Disponible en: <http://www.saij.gob.ar/1141-nacional-normas-aplicables-concesiones-ferroviarias-dn19910001141-1991-06-14/123456789-0abc-141-1000-1991soterced>

Acuerdo Sectorial sobre el Transporte Terrestre de Mercancías Peligrosas MERCOSUR\CMC\DEC N.º 2/94. Disponible en: https://normas.mercosur.int/simfiles/normativas/26384_DEC_002-1994_ES_Acuerdo%20Transporte%20Mercan%20Peligrosas.DOC

Reglamento relativo al transporte internacional de mercancías peligrosas por ferrocarril, que figura como apéndice C al Convenio relativo a los transportes internacionales ferroviarios (COTIF), celebrado en Vilna el 3 de junio de 1999. Disponible en: <https://www.boe.es/boe/dias/2023/06/02/pdfs/BOE-A-2023-13090.pdf>

Mercancías peligrosas en el transporte marítimo: un estado de la cuestión

Hazardous materials in maritime transportation: a state of play

Oscar Correas

Lic. en Seguridad Marítima (Instituto Universitario de Seguridad Marítima). Técnico Superior en Seguridad Marítima (Escuela de Prefectura Gral. Matías Irigoyen). Técnico Superior en Seguridad Marítima Especializado en Puertos, Costas y Fronteras (Escuela Superior PNA). Director de la Agencia Marítima Wave. Docente en el Instituto San Nicolás de Bari. Gerente de IENPAC Argentina SRL.

oelviocorreas@hotmail.com

Palabras clave: Mercancías peligrosas, Seguridad Operacional, Transporte Marítimo, Gestión de Riesgo, Recomendaciones de Seguridad.

Keywords: Hazardous Materials, Safety, Maritime Transportation, Risk Management, Safety Recommendations.

Recibido: 12/07/24
Aceptado: 20/07/24

Resumen

Este trabajo explora de forma breve lo establecido por las principales normativas internacionales que regulan el transporte marítimo de mercancías peligrosas. Asimismo, pone el foco en la clasificación de los distintos tipos de sustancias peligrosas de acuerdo con el Sistema de Clasificación de las Naciones Unidas.

Por otra parte, detalla el contenido de documentos clave que versan sobre los procedimientos de contingencia esenciales para la preparación y respuesta ante potenciales incidentes.

Abstract

This paper briefly explores the main international regulations concerning transporting hazardous materials by sea. It also focuses on the classification of the different types of hazardous substances according to the United Nations Classification System.

Furthermore, it details the content of key documents dealing with the essential contingency procedures to be properly prepared to respond to potential incidents

Introducción

El transporte marítimo desempeña un papel crucial en la economía global; sin embargo, entre las numerosas categorías de carga que se transportan, las mercancías peligrosas representan un desafío único debido a los riesgos inherentes que plantean para la seguridad marítima y la protección del medioambiente. En este artículo, exploraremos diversos aspectos relacionados con el transporte de mercancías peligrosas por mar. Comenzaremos con una introducción detallada de las cargas peligrosas y del Código Marítimo Internacional de Mercancías Peligrosas (IMDG, por sus siglas en inglés), un marco regulador internacional crucial. Profundizaremos en el tema con el Código internacional para la construcción y el equipo de buques que transporten productos químicos peligrosos a granel (Código CIQ) y el Sistema de Clasificación de las Naciones Unidas, que categoriza las mercancías peligrosas en clases y subclases según sus propiedades químicas y físicas, así como los riesgos primarios y secundarios asociados.

También analizaremos los procedimientos de contingencia, esenciales para la preparación y respuesta ante potenciales incidentes. El objetivo es proporcionar una visión integral de cómo se gestionan las mercancías peligrosas en el contexto del transporte marítimo global, subrayando la importancia de cumplir con normativas estrictas para garantizar la seguridad de las tripulaciones, la protección del medioambiente y la eficiencia en la cadena logística internacional.

Normativa internacional

Código IMDG

El Código IMDG es una publicación detallada que produce y actualiza cada dos años el Subcomité de Mercancías Peligrosas, Cargas Sólidas y Contenedores de la Organización Marítima Internacional (OMI). Entró en vigor el 1 de enero de 2004, y todos los Gobiernos contratantes de la OMI deben incorporar sus requisitos en la respectiva legislación nacional. Aunque la información del Código está dirigida a la industria marítima, sus disposiciones pueden ser aplicables para una amplia gama de industrias y servicios tales como los siguientes:

- fabricantes
- embarcadores
- dueños de la mercancías
- puertos
- proveedores de transporte multimodal

El Código IMDG aborda específicamente las cargas sólidas a granel que presentan riesgos para la seguridad marítima debido a su naturaleza química, física o biológica. De acuerdo con el documento, se define carga sólida a granel como cualquier carga no líquida ni gaseosa constituida por una combinación de partículas, gránulos o trozos más grandes de materias, generalmente de composición homogénea, y que se embarca directamente en los espacios de carga del buque sin utilizar para ello ningún elemento intermedio de contención. Estas mercancías pueden incluir minerales de hierro, carbón, cemento y productos químicos, entre otros.

La clave de este código radica en la clasificación precisa de las cargas y la prescripción de procedimientos estandarizados para su manejo, carga, transporte y descarga seguros. Uno de los aspectos más críticos del Código IMDG es la obligación de que las mercancías peligrosas a granel se transporten siguiendo normas estrictas de estiba y sujeción. Esto garantiza que las cargas se mantengan estables durante el transporte marítimo, reduciendo así el riesgo de deslizamientos, vuelcos o contaminaciones que podrían derivarse de una manipulación inadecuada.

Además de la seguridad operativa, el Código IMDG también establece directrices para la protección del medioambiente marino. Esto incluye medidas para prevenir la contaminación del agua y del suelo durante la carga y descarga de sólidos a granel, así como la gestión segura de residuos y productos residuales.

Código CIQ

El Código CIQ establece definiciones conceptuales precisas y normas técnicas detalladas para la construcción, el equipamiento y la operación segura de buques que transportan productos químicos peligrosos. Se trata de una

regulación internacional que proporciona un marco claro para la identificación y clasificación de productos químicos peligrosos, así como los requisitos específicos para la estructura del buque, los sistemas de carga y descarga, y las medidas de seguridad y protección ambiental.

Algunas clasificaciones importantes que aparecen en este código:

- Residuo peligroso: remanente luego del vaciado de un recipiente que contuvo mercancía peligrosa.
- Desecho peligroso: producto regido por el IMDG que no tiene previsto un uso directo, es decir, se transporta para su vertimiento, incineración o eliminación.
- Productos químicos peligrosos a granel: se refiere a cualquier sustancia que, por sus propiedades químicas o físicas, representa un riesgo para la salud humana, el medioambiente o la seguridad en caso de un accidente marítimo. Estos productos pueden incluir sustancias inflamables, tóxicas, corrosivas, reactivas o contaminantes.
- Buque cisterna para productos químicos peligrosos: es un tipo de buque diseñado y construido específicamente para transportar productos químicos peligrosos a granel. Este buque debe cumplir con requisitos rigurosos en términos de materiales de construcción, compartimentación, sistemas de carga y descarga, y medidas de seguridad.
- Grupo de productos químicos: el Código CIQ clasifica los productos químicos peligrosos en varios grupos según sus propiedades y riesgos. Cada grupo tiene requisitos específicos de construcción y equipo para los buques que los transportan. Por ejemplo, hay grupos para sustancias inflamables, tóxicas, corrosivas, etc.
- Límites de carga máxima permitida (LCMP): son los límites específicos establecidos para cada producto químico peligroso, determinados por su peligrosidad y las características del buque. Estos límites aseguran que la carga transportada esté dentro de los parámetros seguros para la estabilidad y seguridad del buque.
- Certificado de producto químico: documento emitido por la administración marítima del país al que pertenece el buque, que certifica que el buque cumple con los requisitos del Código CIQ para transportar productos químicos peligrosos. Este certificado es necesario para demostrar el cumplimiento normativo y para la autorización de carga de productos químicos.
- Compatibilidad química: es la evaluación de la interacción entre diferentes productos químicos que pueden estar presentes en un mismo buque. La compatibilidad química asegura que no ocurran reacciones peligrosas entre las cargas durante el transporte, minimizando el riesgo de accidentes.

Sistema de Clasificación de las Naciones Unidas para Mercancías Peligrosas

El Sistema de Clasificación de las Naciones Unidas proporciona una estructura coherente y globalmente reconocida para categorizar estos materiales según sus propiedades. Esta clasificación detallada les permite a los reguladores, los transportistas y las autoridades competentes aplicar medidas adecuadas para mitigar los riesgos durante el transporte y manejo de estas sustancias.

Clases y subclases de mercancías peligrosas

Clase 1: materiales explosivos

Incluye sustancias y artículos que tienen un riesgo de explosión, como municiones y cohetes.

Clase 2: gases

Comprende gases comprimidos, licuados o disueltos bajo presión, como el gas butano, propano y óxido nítrico.

Clase 3: líquidos inflamables

Incluye líquidos con un punto de inflamación bajo, como la gasolina, el alcohol etílico y el queroseno.

Clase 4: sólidos inflamables

Agrupar sustancias sólidas que pueden encenderse fácilmente (como fósforos), que pueden arder espontáneamente (como ciertos metales) y sustancias que liberan gases inflamables al contacto con el agua (como el litio).

Clase 5: sustancias comburentes y peróxidos orgánicos

Incluye sustancias que promueven la combustión de otros materiales y peróxidos orgánicos que pueden tener efectos explosivos o incendiarios.

Clase 6: sustancias tóxicas e infecciosas

Agrupar sustancias que pueden causar daño grave a la salud humana o al medioambiente si se inhalan, ingieren o entran en contacto con la piel. Esto incluye sustancias tóxicas y patógenos infecciosos.

Clase 7: materiales radioactivos

Comprende sustancias que emiten radiación ionizante, como el uranio y el plutonio.

Clase 8: sustancias corrosivas

Incluye sustancias que pueden corroer metales o destruir tejidos vivos, como ácidos y bases fuertes.

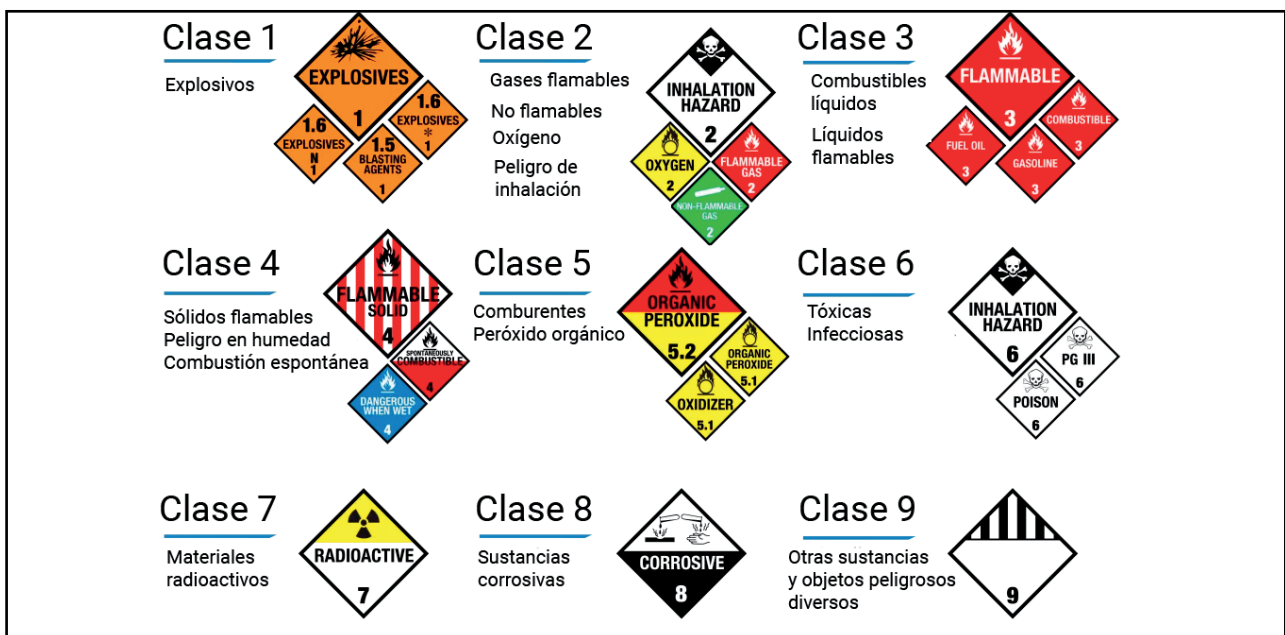
Clase 9: sustancias y objetos peligrosos diversos

Engloba sustancias y objetos que presentan un riesgo durante el transporte, pero no caen en ninguna de las otras clases mencionadas, como mercancías peligrosas en general.

Señales de peligro

Cada clase de material tiene un símbolo asociado que, junto con un juego de colores, forma las etiquetas de peligro, que nos hacen saber qué tipo de sustancia es la que se está transportando. Estas etiquetas deben ir colocadas a cada costado del medio de transporte y en la parte delantera y posterior para que puedan ser vistas desde cualquier ángulo. Cuando un medio transporta varias sustancias en envases distintos, estas etiquetas van en cada envase.

Figura 1. Etiquetas y marcas para el transporte de mercancías peligrosas



Fuente: Tec Containers (2024)

Guía de Respuesta en Caso de Emergencia (2020)

Es un documento destinado al uso de los primeros respondedores durante la fase inicial de un incidente en el transporte que involucre materiales peligrosos. Fue emitida por Transport Canada (responsable de las políticas y programas de transporte de Canadá), el Departamento de Transporte de los Estados Unidos y la Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México. A continuación, se presentan las recomendaciones clave de esta guía:

Identificación y clasificación de materiales peligrosos

La identificación precisa de los materiales peligrosos es el primer paso crucial en la gestión de una emergencia. Los contenedores y embalajes deben estar claramente etiquetados con la designación de la ONU y el número de identificación del material.

Notificación y comunicación

Se debe notificar a las autoridades competentes, tanto marítimas como portuarias y de protección civil locales, tan pronto como se detecte un incidente. Asimismo, establecer canales de comunicación eficaces entre la tripulación del barco y los equipos de respuesta a emergencias para coordinar las acciones.

Evaluación inicial y aislamiento del peligro

Este paso implica determinar la naturaleza del material peligroso, la cantidad involucrada y el posible impacto en la salud humana y el medioambiente. Para ello, es crucial implementar un perímetro de seguridad para evitar la exposición innecesaria. Esto incluye el uso de barreras físicas y la restricción del acceso a personas no autorizadas.

Implementación de medidas de control

Utilizar equipos y materiales adecuados para contener el material peligroso y evitar su dispersión. Esto puede incluir el uso de barreras flotantes, materiales absorbentes y sistemas de contención de derrames. Aplicar agentes neutralizantes o dispersantes para reducir la peligrosidad del material, siempre que sea posible y seguro.

Evacuación y primeros auxilios

Si el incidente representa un peligro inminente para la tripulación y el personal en las inmediaciones, se deben seguir procedimientos de evacuación bien definidos. Además, hay que proporcionar primeros auxilios a los afectados. Es vital asegurar que los botes salvavidas y equipos de evacuación estén operativos y accesibles.

Coordinación con equipos de respuesta externos

La guía enfatiza la importancia de la colaboración con equipos de respuesta externos, incluidos los servicios de emergencia locales, equipos especializados en materiales peligrosos y autoridades medioambientales. Esta coordinación asegura una respuesta integral y eficaz.

Documentación y reporte del incidente

Documentar todos los aspectos del incidente es fundamental para las evaluaciones posteriores y la mejora continua de los procedimientos de emergencia. Resulta vital mantener un registro detallado de todos los eventos, las acciones tomadas y las decisiones durante la emergencia.

Por otra parte, existen documentos de uso obligatorio en el lugar de trabajo, como las Hojas de Seguridad (HDS). Estas brindan información sobre materiales peligrosos, específicamente en lo que refiere a lo siguiente: riesgos, transporte, manipulación, almacenamiento, emergencias, identificación del vendedor. Asimismo, se deben presentar informes completos a las autoridades pertinentes, incluyendo detalles sobre la naturaleza del incidente, las medidas de respuesta y los resultados obtenidos.

Guía Internacional de Seguridad para Buques Petroleros y Terminales 2020 (ISGOTT)

Su propósito es establecer las mejores prácticas y los procedimientos de seguridad para prevenir accidentes y minimizar riesgos en las operaciones de buques petroleros y terminales. En su elaboración participaron la OMI, la Federación Internacional de Empresas Petroleras (IPIECA) y la Cámara Internacional de Navegación (ICS). Se divide en distintas partes:

Parte 1: información general

Se abordan las normas y reglamentos internacionales que rigen las operaciones de buques petroleros y terminales, incluyendo las normativas de la OMI. Asimismo, se detallan principios básicos de seguridad.

Parte 2: buques tanqueros

En este apartado se detalla todo lo pertinente al diseño y la construcción de los buques, se describen las operaciones pertinentes para la carga y descarga, y se listan los equipos y sistemas de seguridad que deben estar presentes a bordo, como sistemas de detección de gases, equipos de lucha contra incendios y dispositivos de protección personal.

Parte 3: información sobre la terminal

Esta sección aborda los aspectos relacionados con las terminales donde se efectúan las operaciones de transferencia de petróleo. Los temas centrales son diseño y operación, control de riesgos e inspección y mantenimiento.

Parte 4: gestión de interfaz del buque y del terminal

Se trata de un aspecto crítico para las operaciones de transferencia. El énfasis está puesto en la evaluación de riesgos, la optimización de los procesos de comunicación y los procedimientos operativos para la transferencia de petróleo entre el buque y la terminal, incluyendo la gestión de emergencias y la respuesta a incidentes.

Conclusiones

A lo largo de este artículo se listaron y describieron de manera sucinta las principales normativas que abordan la problemática del transporte marítimo de mercancías peligrosas. Este trabajo presenta un panorama inicial para comprender la complejidad del entramado normativo y los principales tipos de sustancias peligrosas existentes, así como su clasificación según la ONU.

Las regulaciones no solo hacen hincapié en la seguridad operativa, sino que también establecen directrices para la protección del medioambiente marino. Esto incluye medidas para prevenir la contaminación del agua y del suelo durante las operaciones de carga y descarga, así como la gestión segura de residuos y productos residuales. La implementación rigurosa de estas prácticas y la difusión del conocimiento promueve una cultura de seguridad y responsabilidad en toda la industria, al tiempo que permite reducir significativamente los riesgos para la vida humana, asegurando una respuesta rápida y coordinada ante cualquier contingencia.

Bibliografía

Cámara Internacional de Comercio; Asociación Internacional de Productores de Gas y Petróleo; Foro Marítimo Internacional de Productores de Petróleo. (2020). *Guía Internacional de Seguridad para Buques Petroleros y Terminales (ISGOTT 6)* (6.ª ed.). Londres, Reino Unido: Witherby Publishing Group Ltd.

Naciones Unidas. (2019). *Recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas: Manual de pruebas y criterios* (7.ª ed.). Nueva York y Ginebra: Naciones Unidas.

Transport Canada, Departamento de Transporte de los Estados Unidos & Secretaría de Comunicaciones y Transporte de México. (2020). *Guía de Respuesta en Caso de Emergencia*. Recuperado de: <https://tc.canada.ca/sites/default/files/2020-08/PDF%20Spanish.pdf>

DOSSIER

Gestión de emergencias en el transporte de mercancías peligrosas por carretera

Management of emergencies related to the highway transportation of hazardous materials

Claudio Marcelo Dominguez

Licenciado en Sistemas de Protección contra Siniestros por el Instituto Universitario de la Policía Federal Argentina. Máster en Protección Contra Incendios. Analista de Respuesta a Emergencias PROFERTIL S.A. Perito en Contaminación y Mercancías Peligrosas. Perito de Incendios en Buques e Instalaciones Portuarias.

pumaclaudio@gmail.com

Palabras clave: Mercancías Peligrosas, Seguridad Operacional, Transporte Automotor, Gestión de Riesgos, Prevención de Accidentes.

Keywords: Hazardous Materials, Safety, Highway Transportation, Risk Management, Accident Prevention.

Recibido: 13/07/24

Aceptado: 21/07/24

Resumen

El documento destaca la importancia de la planificación y la capacitación de los responsables en la gestión de emergencias, así como la colaboración entre entidades y la difusión de información veraz y oportuna para mantener la credibilidad de las autoridades y tranquilizar a la población. En resumen, la preparación, la comunicación efectiva y la colaboración son fundamentales para garantizar la seguridad de las personas y el medio ambiente en situaciones de emergencia relacionadas con el transporte de mercancías peligrosas por carretera.

Abstract

The document stresses the importance of planning and training of emergency managers, as well as inter-agency collaboration and the dissemination of accurate and timely information to maintain the credibility of the authorities and reassure the public. In short, preparedness, effective communication and collaboration are essential to ensure the safety of people and the environment in emergency situations involving the transport of dangerous goods by road.

Introducción

Actualmente, el transporte de mercancías peligrosas por carretera presenta desafíos continuos para la seguridad y la respuesta frente a emergencias. Ante cualquier incidente que involucre sustancias peligrosas, es fundamental contar con un plan de acción bien estructurado y un equipo especializado para garantizar la seguridad de las personas y el medioambiente.

La respuesta a emergencias ocasionadas en el transporte de mercancías peligrosas por carretera requiere una coordinación cuidadosa entre entidades, como los servicios de emergencia, las autoridades locales, los equipos de respuesta especializados y los habitantes o actores indirectamente afectados por el peligro transportado. Es fundamental que todos los involucrados estén debidamente capacitados y equipados para actuar de manera eficaz en situaciones de riesgo.

La prevención se torna un factor clave y resulta esencial que las empresas transportistas, los dadores y los receptores de la carga cumplan con todas las normativas y medidas de seguridad para minimizar la posibilidad de incidentes. También es crucial realizar un seguimiento constante del estado de las vías de transporte y de los vehículos utilizados, para asegurar que se encuentren en condiciones óptimas. Todo plan de respuesta a emergencias debe incluir la identificación de riesgos potenciales, la asignación de responsabilidades, la comunicación efectiva entre los diferentes actores y la coordinación de las acciones a tomar.

En esta publicación, se pretende analizar los aspectos a considerar para enfrentar una emergencia con mercancías peligrosas y optimizar la planificación de la respuesta.

Preparación para una emergencia

La Cámara Argentina del Transporte Automotor de Mercancías y Residuos Peligrosos (CATAMP) y el Centro de Información para Emergencias en el Transporte (CIPET) emitieron —junto al Ministerio de Seguridad de la Nación— el Manual de Riesgos en el Transporte de Mercancías y Residuos Peligrosos, donde se incluyen simulaciones para la estimación del riesgo en accidentes de transporte de mercancías y residuos peligrosos¹. En dicho manual, se emplea el modelo numérico ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres)² proyectado sobre Google Earth (archivo KML) para preparar la respuesta a una emergencia. Este sistema modela escapes químicos y estima el patrón de dispersión de la nube tóxica generada, así como escenarios que involucran incendios y explosiones. Es una herramienta de planificación y de respuesta, ya que produce resultados a una velocidad acorde a los peligros.

Dentro de sus capacidades, ALOHA genera gráficos de zonas de distinta peligrosidad. En adición, calcula la velocidad de escape de sustancias desde tanques, charcos y tuberías, así como la variación de la tasa de liberación en función del tiempo. Por otra parte, modela nubes tóxicas, explosiones de nubes de gas y fuego en superficies abiertas y también distintas amenazas: toxicidad, inflamabilidad, radiación térmica y sobrepresión. Por último, proyecta los lugares afectados en caso de accidentes con transporte de mercancías peligrosas, considerando la latitud y longitud del sitio del accidente.

Entonces, la georreferenciación del lugar del accidente o incidente representa el primer factor fundamental en la respuesta a emergencias con mercancías peligrosas en carretera. Este dato es primordial para cualquier modelación o búsqueda en bases utilizadas tanto por CATAMP y CIPET como por empresas dedicadas a proveer mercancías peligrosas, ya sean sólidas, líquidas o gases comprimidos.

También se dispone de una aplicación llamada ECOFILE, que permite determinar en un radio de búsqueda específico cuáles son las entidades involucradas, como escuelas, hospitales, entre otros, que pueden verse afectadas ante una emergencia. Esta aplicación integra archivos KML para la determinación de la huella (calculada en ALOHA), permitiendo visualizar posibles instituciones involucradas.

Como se mencionó, es esencial contar con la posición precisa del evento (latitud y longitud) para la preparación y planificación de la estrategia de respuesta a una emergencia con mercancías peligrosas. La cuestión es: ¿cómo se obtiene este dato al momento del accidente? A priori, personal policial o bomberos podrían proporcionar ese dato o, en su defecto, cualquier persona que transite circunstancialmente por el lugar, siempre y cuando cuente con un dispositivo GPS o celular con señal. De lo contrario, esto representaría un primer inconveniente a solucionar en los instantes iniciales de la emergencia.

Otra alternativa, considerada más precisa y rápida, es que el transporte contenga un sistema de seguimiento sa-

¹ Ver páginas 4 a 18 del manual de referencia en: <https://www.catamp.org.ar/wp-content/uploads/2018/12/manual-de-riesgos-en-el-transporte-de-mercancias-y.pdf>

² Desarrollado conjuntamente por la Administración Nacional del Océano y la Atmósfera y la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos.

telital. Esto permitiría obtener, en caso de un accidente, los datos georreferenciados del lugar donde se produjo el evento. Para ello, es necesario que tanto el dador de carga como el transportista y el receptor decidan establecer este sistema de seguimiento y control de los vehículos de transporte al momento de celebrar el contrato. De lo contrario, habría demoras tanto en la planificación como en la respuesta a la emergencia propiamente dicha.

La segunda parte de la planificación, basada en los datos aportados por la evaluación de riesgos realizada con ALOHA³, implica considerar el lugar y la categorización de la emergencia. Este modelo numérico establece niveles de peligro por default, empleando valores definidos en la Acute Exposure Guideline Levels (AEGLs)⁴. La AEGLs es una guía que contiene información sobre los valores de concentración de sustancias químicas que causarían efectos negativos sobre la salud de distinta gravedad si una persona promedio estuviese expuesta durante un cierto período. Los períodos de exposición varían desde 10 minutos a 8 horas (10 min, 30 min, 1 h, 4 h y 8 h) y se caracterizan por diferentes grados de toxicidad. Para una exposición de duración determinada, una sustancia puede tener hasta tres valores, cada uno de los cuales indica una categoría específica de efectos sobre la salud.

- AEGL-1: concentración a un nivel o por encima del cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, puede experimentar una incomodidad notable. Concentraciones por debajo del AEGL-1 pueden causar ligero olor, sabor u otra irritación sensorial leve.
- AEGL-2: concentración a un nivel o por encima del cual se predice que la población, incluyendo individuos susceptibles, puede experimentar efectos serios o irreversibles a largo plazo, o impedir su capacidad para escapar. Concentraciones por debajo del AEGL-2, pero por encima del AEGL-1, pueden causar notable malestar.
- AEGL-3: concentración a un nivel o por encima del cual se predice que la población general, incluyendo individuos susceptibles, podría experimentar efectos amenazantes para la vida o la muerte. Concentraciones por debajo del AEGL-3, pero por encima del AEGL-2, pueden causar efectos a largo plazo, serios o irreversibles, o impedir la capacidad de escapar.

Estos niveles de exposición son aplicables a toda la población, inclusive niños y otros individuos susceptibles, excluyendo a los hipersusceptibles. Al igual que se definen los AEGLs en el modelo ALOHA, también se pueden establecer tres niveles de respuesta a emergencia según la ruta y la densidad demográfica de las áreas afectadas por el transporte de mercancías peligrosas:

- Nivel 1 (verde): lugar descampado que no pone en riesgo a ninguna población o ciudad, pero puede afectar a un número considerable de personas que transitan con sus vehículos.
- Nivel 2 (amarillo): lugar que pone en riesgo a una población con densidad demográfica mayor a 3000 habitantes, pero menor a 15.000 habitantes.
- Nivel 3 (rojo): lugar que pone en riesgo a una población con densidad demográfica mayor a 15.000 habitantes.

Lo mencionado previamente puede apreciarse con un ejemplo hipotético. El 14 de octubre de 2021, un camión que transportaba amoníaco anhidro sufrió un accidente a la altura de la localidad de Azul, mientras circulaba por la Ruta Nacional 3 con destino a Ensenada, Provincia de Buenos Aires. El suceso provocó un orificio de 2,5 mm de diámetro en la zona de válvulas del camión. A continuación, se presenta una simulación del análisis del accidente citado.

Tabla 1. Datos del lugar

Ubicación	Elevación (msnm)	Habitantes	Latitud	Longitud
Azul, Argentina	132	55.728	36° 47' 37.92" S	59° 50' 33.44" O

Construcción de las renovaciones de aire por hora	Fecha
0,42 (un solo piso a la intemperie)	14 de octubre de 2021, 10:02 ST (hora del reloj de la computadora)

³ ALOHA proporciona la dispersión gaussiana para el peor caso en una hora como mínimo.

⁴ Guía de exposición de niveles agudos.

Tabla 2. Datos químicos

Nombre del químico	Número CAS	Peso molecular	AEGL-1 (60 min)	AEGL-2 (60 min)	AEGL-3 (60 min)	IDLH	LEL	UEL
Amoníaco	7664-41-7	17,03 g/mol	30 ppm	160 ppm	1100 ppm	300 ppm	150000 ppm	280000 ppm
Punto de ebullición ambiental			Presión parcial a temperatura ambiente			Concentración de saturación del ambiente		
-33,7° C			mayor a 1 atm			1.000.000 ppm o 100,0%		

Tabla 3. Datos atmosféricos (ingreso manual de datos)

Viento	Dureza del suelo	Nubosidad	Temperatura del aire	Clase de estabilidad	Sin inversión en la altura	Humedad relativa
3,06 m/seg. desde S a 10 m	urbana o forestal	10 décimos	14,2° C	D	-	99%

Tabla 4. Intensidad de la fuente*

Fuga	Tipo de químico	Diámetro del tanque	Longitud del tanque	Volumen del tanque	Contenido del tanque	Temperatura interna
Desde un agujero en un tanque cilíndrico horizontal	Sustancia inflamable escapando del tanque (no ardiendo)	2 metros	12,38 metros	38,9 metros cúbicos	Líquido	5° C

Masa química en el tanque	Porcentaje del tanque lleno	Diámetro de apertura circular	Apertura desde el fondo del tanque	Duración de la liberación	Tasa de liberación sostenida máxima	Cantidad total liberada
24,4 t	90 %	4,5 cm	40 cm	32 minutos	1330 kg/min (promedio durante un minuto o más)	19,332 kg

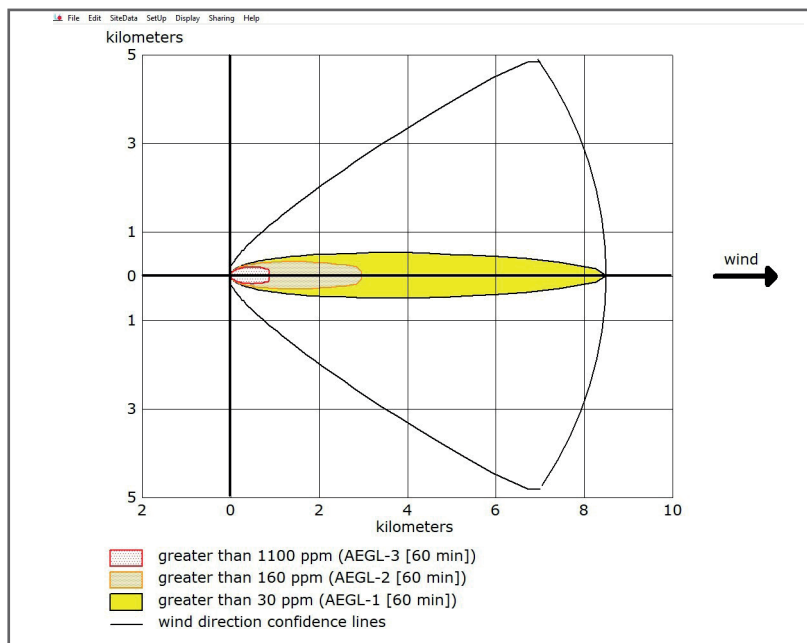
*Nota: el químico escapó como una mezcla de gas y aerosol (flujo en dos fases)

Tabla 4. Zona de amenaza

Modelo ejecutado	Rojo	Naranja	Amarillo
Gas pesado	884 metros --- (1100 ppm = AEGL-3 [60 min])	3,0 kilómetros --- (160 ppm = AEGL-2 [60 min])	8,5 kilómetros --- (30 ppm = AEGL-1 [60 min])

En la siguiente figura se ilustra la pluma de dispersión calculada por el programa ALOHA.

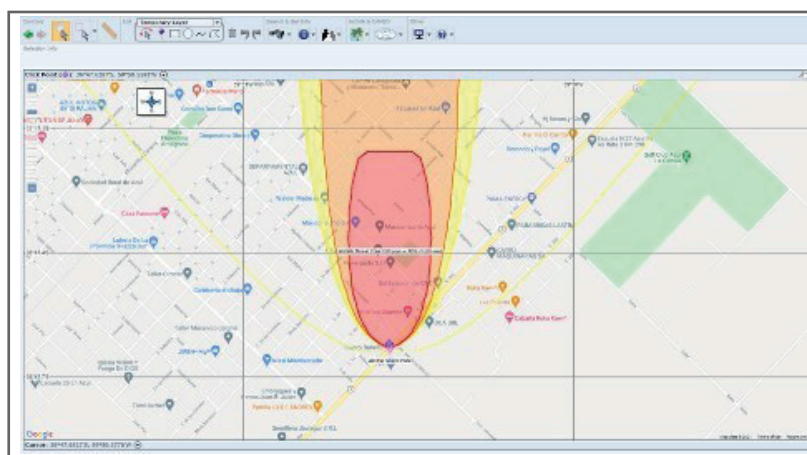
Figura 1. Cálculo de la pluma de dispersión



Fuente: elaboración propia

La Figura 2 ilustra los resultados trasladados al software MARPLOT⁵, que muestra estimaciones de la zona de amenaza calculada en ALOHA. Se trata de un sistema de mapas y cartografías que permite la diagramación de aplicaciones de tareas para respuesta, planificación y operaciones locales.

Figura 2. Captura de pantalla de MARPLOT



Fuente: elaboración propia

⁵ Para mayor información, visitar <https://response.restoration.noaa.gov/oil-and-chemical-spills/chemical-spills/marplot>

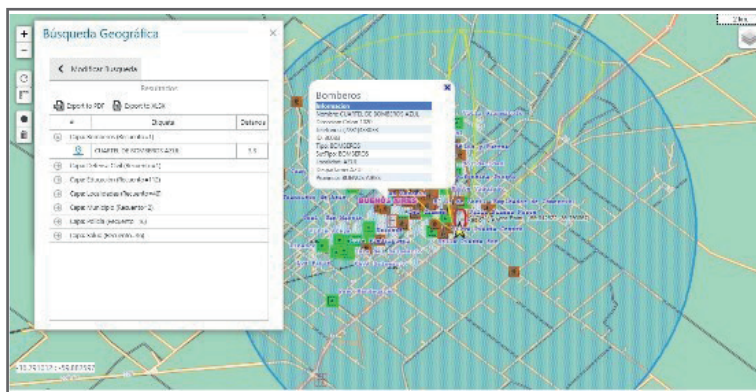
Las Figuras 3 y 4 corresponden al sistema ECOFILE. Al superponer la pluma de dispersión calculada en ALOHA, el funcionamiento de ECOFILE permite determinar las entidades involucradas en un radio de búsqueda específico.

Figura 3. Captura de pantalla de ECOFILE



Fuente: elaboración propia

Figura 4. Captura de pantalla con vista ampliada de ECOFILE



Fuente: elaboración propia

Figura 5. Proyección de la pluma o nube de dispersión sobre una imagen de Google Earth



Fuente: elaboración propia

Un aspecto fundamental para la respuesta a emergencias es contar con una base de datos que permita alertar a las autoridades de control de la emergencia (personal policial, bomberos, personal de Defensa Civil, de Gendarmería, de Medioambiente, etc.) y a escuelas, hospitales, centros de atención médica y otros establecimientos que puedan estar dentro del radio calculado. Este tipo de información puede recabarse de diferentes softwares que disponen de bases de datos con números telefónicos y direcciones de las entidades involucradas de forma directa o indirecta en la emergencia. Como ejemplo, podemos citar a CIPET o ECOFILE (ver Figuras 3 y 4). Una vez establecida la planificación de la respuesta a la emergencia, es imprescindible proceder con la capacitación y el apren-

dizaje sobre las medidas de protección. Esto incluye tanto al personal directamente involucrado en la respuesta como a aquellos que, indirectamente (habitantes de pueblos, ciudades o transeúntes), puedan verse afectados.

Capacitación y simulacros

La capacitación y el entrenamiento de todos los involucrados se convierte en el segundo factor preponderante para una eficiente y eficaz respuesta a la emergencia. Parece sencillo entrenar a bomberos, policías, personal de salud, entre otros, pero en la práctica es una de las tareas más difíciles y desafiantes que enfrentan tanto los dadores de carga como las empresas de transporte. Algunas empresas, caracterizadas como dadoras de carga o transportistas, realizan capacitaciones generales organizando encuentros, simposios, jornadas o congresos para dar a conocer estos aspectos tanto ante los profesionales de la respuesta como ante las personas indirectamente involucradas y el público en general. Si bien estos eventos de capacitación y transmisión de conocimientos son muy prácticos, a menudo quedan acotados a un público técnico específico, sin abarcar a la mayor cantidad de personas posible.

Es importante aclarar que nunca se puede obtener el 100 % de la presencia de las personas directa o indirectamente afectadas en casos de emergencias con mercancías peligrosas. Sin embargo, existen alternativas de escaso costo que pueden dar buenos resultados en cuanto a la convocatoria. Una de estas estrategias es la organización de eventos en distintas localidades de mediano y alto riesgo (niveles 2 y 3 de emergencia), como la capacitación del Proceso APELL (Awareness and Preparedness for Emergencies at Local Level) sobre manejo integral de incidentes químicos, realizada en Bahía Blanca⁶. Otro aspecto para tener en cuenta es la realización de simulacros de escritorio y de campo, un complemento indispensable para comprobar si una capacitación es eficiente y eficaz.

Aunque en el marco legal y reglamentario de Argentina se estipula la capacitación, no se establece la obligatoriedad de los simulacros (de escritorio o de campo) para comprobar la eficiencia y eficacia del entrenamiento recibido. Las diferencias entre un simulacro de escritorio y uno de campo son las siguientes:

- Simulacro de escritorio: es un ejercicio teórico en el que todas las partes involucradas se reúnen en un espacio determinado y desarrollan las acciones a llevar a cabo bajo una hipótesis de emergencia consensuada.
- Simulacro de campo y en tiempo real: es un ejercicio práctico en el que todas las partes involucradas se reúnen en un lugar específico de la ruta por donde circulan los camiones de mercancías peligrosas. En este simulacro, se llevan a cabo las acciones de mitigación de la emergencia, permitiendo la intervención real de todas las personas involucradas en su gestión.

En términos ideales, cada simulacro de campo debería estar precedido por uno de escritorio. Este paso previo permite identificar las fortalezas y vulnerabilidades de la planificación de respuesta a emergencias. Como se dijo antes, la reglamentación legal vigente no establece la obligatoriedad de realizar simulacros ni la frecuencia con la que deben llevarse adelante. Sin embargo, en función de la gestión de riesgos y de las características de las mercancías peligrosas a transportar, es importante hacer simulacros cada dos o tres años en las diferentes rutas por donde circulan los camiones que transportan estos productos.

Comunicaciones en emergencias

El tercer factor fundamental en la respuesta a emergencias son las comunicaciones. Sin ellas, las acciones se vuelven difíciles de concretar y es imposible obtener resultados satisfactorios. El comando de incidentes en escena y las comunicaciones conforman la médula espinal del sistema de respuesta de emergencia en ruta para el transporte de mercancías peligrosas. Por ello, es necesario contar con un sistema adecuado y efectivo, que no tenga interferencias y que sea lo suficientemente sólido como para evitar vulnerabilidades durante la mitigación del riesgo. Este sistema también debe ser robusto e invulnerable en situaciones normales, y evitar la introducción de comunicaciones inexactas que puedan llevar a tomar decisiones basadas en hechos falsos o imprecisos.

Para sortear estos problemas, es crucial desarrollar un sistema troncal de comunicaciones, donde cada responsable pueda comunicarse con su comando sin interferir con los otros, evitando malas interpretaciones o cortes en la emisión de los comunicados. El objetivo principal de las comunicaciones en la gestión de la respuesta a emergencias es transmitir directivas y acciones para preservar vidas y propiedades. Es fundamental identificar criterios o factores que activen las comunicaciones para gestionar el incidente e implementar la respuesta a la emergencia. Este proceso debe activarse rápidamente para decidir qué acciones se van a tomar y transmitir los primeros pasos para contener y controlar la situación.

⁶ Para mayor información, visitar: <https://www.bahia.gob.ar/gobierno/apell/>

Una vez iniciada la primera comunicación de emergencia, es crucial especificar claramente la situación, categorizando la emergencia según los niveles establecidos (nivel 1, 2 o 3). Los pasos sugeridos son los siguientes:

- **Alerta:** este paso consiste en el mecanismo de comunicación para alertar y "poner en acción" a los equipos de emergencia. Implica desde la solicitud de confirmación de un incidente o accidente vial hasta la notificación a los equipos de intervención sobre la necesidad de su participación. En ocasiones, también se debe informar al equipo encargado de la evacuación o el confinamiento de personas en el área afectada, para evitar la llegada de personas o recursos no entrenados que puedan obstaculizar la respuesta. Una vez ocurrido el accidente o incidente vial, el personal policial o los bomberos destinados al lugar procederán con las comunicaciones necesarias para dar la alarma, iniciando así el proceso de respuesta a la emergencia.
- **Alarma:** este es el punto de inicio para las operaciones de intervención, lo cual implica el desplazamiento de unidades y personal especializado para controlar y mitigar la emergencia. Durante esta fase, participarán el comité de crisis, el comando de incidentes en escena y los equipos de apoyo a los bomberos.
- **Intervención:** durante esta etapa, las comunicaciones serán por transmisión de acciones o conjunto de acciones necesarias para el control y la mitigación de la emergencia definida en los diferentes niveles y asignada a los distintos equipos. Es crucial destacar que, durante esta fase, las comunicaciones a los equipos de intervención deben ser rápidas y organizadas para evitar interferencias entre los responsables y garantizar una cobertura eficiente por parte del comando de incidentes en escena.

También se incluyen las comunicaciones a las personas involucradas indirectamente en la emergencia, como los residentes o transeúntes. Estas comunicaciones deben ser claras, precisas y comprensibles para cualquier persona, independientemente de su grupo etario. Las instrucciones deben ser proporcionadas por voceros o medios de comunicación coordinados, garantizando seguridad y cumplimiento de los objetivos del plan de respuesta. De lo contrario, podría surgir incertidumbre, miedo o caos, dejando a las personas indecisas sobre la necesidad de evacuación o confinamiento.

Seguridad de las personas involucradas directa e indirectamente

Cuando se produce la emergencia, hay personas involucradas de manera directa (las que están en el accidente o incidente) e indirecta, las que circulan por el lugar o los habitantes de las poblaciones aledañas. La toma de decisiones en ese momento por parte del comando de incidentes en escena debe ser coordinada y ejecutada por la dirección de Defensa Civil de la localidad afectada. Esta decisión puede implicar, en términos del número de evacuados o personas a confinar, una escala de respuesta que exceda la cotidiana, como la evacuación o el confinamiento de una parte importante o la totalidad de un pueblo, ciudad o región.

La planificación eficaz es crucial para salvar vidas y reducir los riesgos. En tal sentido, una vez decididas las acciones de evacuación o confinamiento, hay que establecer puntos de referencia, rutas de escape y centros con las atenciones necesarias para los derivados. El confinamiento, tanto en domicilios particulares como en edificios públicos (escuelas, municipalidades, gobernaciones, supermercados, galerías de pública concurrencia, etc.), debe priorizarse mediante un aviso previo. Es esencial determinar cuándo se realiza y por qué medios se comunica la necesidad de confinarse (sirenas comunitarias, alertas por radio o uso de redes sociales, entre otros medios). Todas estas alternativas deben ser pensadas, planificadas y documentadas en un plan integral que, además de ser fácilmente comprendido por todos los actores involucrados en la respuesta a una emergencia, también pueda ser bien interpretado por las personas que, indirectamente, se verán afectadas por dicha emergencia. Un plan que prepare a la población para reaccionar eficazmente y que permita comprender y visualizar un área en riesgo o afectada proporciona a los tomadores de decisiones la información necesaria para determinar si se debe proceder con un confinamiento o una evacuación.

La capacitación y la divulgación de este plan integral son piezas clave para evitar poner en mayor riesgo a las personas que posiblemente se encuentren involucradas de manera indirecta en una emergencia. En el capítulo 5 de la norma IRAM-ISO 22315⁷ (Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización, 2017), se identifican claramente las características de la población, y se emiten recomendaciones a la organización de respuesta para conocer los grupos sociales importantes, evaluar sus necesidades y usar los métodos de comunicación apropiados para informar a cada uno de ellos de la posible área afectada o en riesgo.

⁷ Dentro de esta norma ISO, se puede encontrar una ayuda para diseñar una estrategia efectiva de seguridad y protección de las personas afectadas, directa o indirectamente, por una emergencia en ruta con mercancías peligrosas. Proporciona directrices detalladas y recomendaciones prácticas para mejorar la respuesta y gestión de situaciones de emergencia, asegurando la protección y el bienestar de la población involucrada.

Dicho capítulo establece la siguiente tabla para tener en cuenta las características de la población y sus consideraciones potenciales:

Tabla 5. Consideraciones para el grupo de respuesta

Características	Consideraciones potenciales
Edad	Producir materiales de comunicación adaptados a los diferentes grupos de edad, por ejemplo, usando imágenes para niños pequeños, texto de mayor tamaño para los adultos mayores y medios de comunicación social para llegar a los adolescentes y adultos jóvenes
Cultura	Suministrar asesoría y producir materiales que tengan en consideración sensibilidades culturales
Tiempo en el área (residente permanente o en el área por un período fijo de tiempo)	Focalizar miembros de la población que estén en el área durante un período fijo de tiempo
Socioeconómico	Proveer información que sea accesible para diferentes grupos socioeconómicos
Género	Producir comunicaciones que reflejen diferentes necesidades y expectativas de género
Idioma hablado	Producir comunicaciones en diferentes idiomas y para diferentes niveles de alfabetización
Ubicación y proximidad al riesgo	Producir diferentes mapas de peligro para distintas áreas geográficas
Obligaciones ocupacionales	Personas con responsabilidades y obligaciones relacionadas con sus ocupaciones pueden tener necesidades particulares durante una evacuación o confinamiento. Por ejemplo, los agricultores pueden requerir información sobre qué hacer con su ganado durante una evacuación masiva
Afiliaciones políticas	Producir comunicaciones adaptadas a diferentes afiliaciones políticas
Religión	Producir comunicaciones adaptadas a las necesidades de diferentes religiones
Vulnerabilidad	Proveer a las personas vulnerables con servicios de información disponibles para apoyarlos durante una evacuación. Por ejemplo, que las personas con dificultades de audición puedan ser advertidas mediante mensajes de texto

Fuente: Norma IRAM-ISO 22315, capítulo 5

Colaboración con bomberos y servicios de rescate⁸

Los responsables de responder a emergencias (bomberos, personal policial y de Defensa Civil, rescatistas, sistema de salud, etc.) deben exponerse a los desafíos de las emergencias durante el entrenamiento y ejercicio de liderazgo, para que sean conscientes de la necesidad de tomar decisiones con urgencia y sin conocer todos los hechos. Cambiar la cultura de trabajo de una organización en momentos de estrés y desafío puede ser excepcionalmente difícil.

⁸ Extracto del capítulo 5 de la BS 11200:2014 (British Standard, 2014).

La única manera práctica de preparar líderes para estos contextos es mediante una capacitación rigurosa, realista y repetida, que les permita poner a prueba todas las implicaciones de los posibles escenarios. Los problemas que deben enfrentar los líderes normalmente son complejos y graves, y pueden afectar a las personas, su reputación y los activos.

Las características de estas tareas se pueden sintetizar del siguiente modo:

- Tendrán que tomar decisiones rápidamente y sin toda la información y recursos que desearían tener.
- Tendrán que lidiar con problemas difíciles de entender que amenazan seriamente la viabilidad de la organización y la seguridad y el bienestar de las personas.
- Tendrán que trabajar en un entorno incierto y posiblemente caótico.
- Necesitarán imponer calma, autoridad y confianza, respaldados por firmeza. Necesitarán ejercer control o ser vistos ejerciéndolo (su liderazgo debe ser altamente visible).
- Deberán actuar en circunstancias que probablemente no hayan experimentado previamente de manera directa.
- Necesitarán hacer todo lo mencionado previamente mientras ellos y las personas en las que confían están bajo estrés, lo cual afecta el procesamiento y la comunicación de la información.

La organización de la defensa civil en Argentina se encuentra dentro de la Ley N.º 27.287, la cual crea el Sistema Nacional para la Gestión Integral del Riesgo y la Protección Civil (SINAGIR). Este sistema tiene por objeto integrar las acciones y optimizarlas para reducir los riesgos y gestionar adecuadamente el manejo de crisis y la recuperación, articulando el funcionamiento de los organismos del Gobierno nacional, los Gobiernos provinciales y municipales, la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, las organizaciones no gubernamentales y la sociedad civil.

La colaboración entre estos actores debe ser previa a la emergencia, es decir, en la etapa de planificación. Con ellos, se deben conocer bien los riesgos y las mercancías peligrosas que transitan por la zona, presentar las diferentes alternativas viables según las capacidades de respuesta de cada organismo, las capacitaciones necesarias y, sobre todo, la práctica para evaluar la eficiencia y eficacia en la respuesta ante una emergencia.

Cabe recordar que la gestión de respuesta a emergencias incluye un análisis de riesgos previo y la debida planificación de los recursos. Esto implica una respuesta adecuada al riesgo utilizando los máximos recursos disponibles (sin exagerar y acabar en un uso indiscriminado que deje vulnerable a la población ante otros posibles riesgos). Por otro lado, resultan vitales la toma de decisiones planificadas durante la emergencia y una evaluación posterior para analizar las situaciones vividas, recomponer la situación y obtener los aspectos de mejora para la modificación del plan. Estas acciones son fundamentales para ayudar a bomberos, servicios de rescate y otras personas directamente involucradas en la respuesta a una emergencia.

Planificación de las rutas del transporte

En Argentina, el Reglamento General para el Transporte de Mercancías Peligrosas (Decreto N.º 779/1995, anexo S) constituye la base del marco normativo en la materia. Este ordenamiento establece tanto las reglas como los procedimientos y explicita las exigencias y responsabilidades en el transporte de este tipo de productos. Cabe aclarar que el transporte de mercancías peligrosas solo puede ser realizado por vehículos y equipamientos (como cisternas y contenedores) cuyas características técnicas y estado de conservación garanticen una seguridad compatible con los riesgos correspondientes a las mercancías transportadas (Decreto N.º 779/1995, anexo S, art. 9).

Según el artículo 24 del decreto citado, el transportista deberá programar el itinerario del vehículo que transporte mercancías peligrosas de forma tal de evitar, si existe alternativa, el uso de vías en áreas densamente pobladas o de protección de embalses, reservas de agua o reservas forestales y ecológicas, o sus proximidades, así como el uso de aquellas de gran afluencia de personas y vehículos en los horarios de mayor intensificación de tránsito.

Evidentemente, este itinerario del transporte debe analizarse y consensuarse con el dador de carga, iniciando la planificación de una respuesta a una posible emergencia durante el trayecto desde el lugar de carga hasta el destino donde se descargará la mercancía peligrosa. Dicho análisis prevé una interacción entre el dador de carga, el transportista y el cliente receptor de la carga, permitiendo establecer los lugares por donde circulará el transporte, los sitios destinados para estacionamiento o descanso, así como los procedimientos a seguir en caso de emergencia. Resulta importante reproducir lo que establece el Decreto N.º 779/1995 en sus artículos 36 al 39:

Art. 36: en caso de accidente, avería u otro hecho que obligue a la inmovilización del vehículo que transporte mercancías peligrosas, el conductor adoptará las medidas indicadas en las instrucciones escritas a que se refiere el literal b) del artículo 35⁹, dando cuenta a la autoridad de tránsito o de seguridad más próxima, por el medio disponible más rápido, detallando lo ocurrido, el lugar, las clases y cantidades de los materiales transportados

Art. 37: en razón de la naturaleza, extensión y características de la emergencia, la autoridad que intervenga en el caso requerirá al expedidor, al fabricante o al destinatario del producto la presencia de técnicos o personal especializado.

Art. 38: en caso de emergencia, accidente o avería, el fabricante, el transportista, el expedidor y el destinatario de la mercancía peligrosa darán apoyo y prestarán las aclaraciones que les fueran solicitadas por las autoridades públicas.

Art. 39: las operaciones de transbordo en condiciones de emergencia deben ser ejecutadas de conformidad con las instrucciones del expedidor, fabricante o del destinatario del producto y, si es posible, con la presencia de la autoridad pública. 1. Cuando el transbordo fuera ejecutado en la vía pública, deben ser adoptadas las medidas de seguridad en el tránsito y protección de personas y del medio ambiente. 2. Quienes actúen en estas operaciones deben utilizar los equipos de manipuleo y de protección individual recomendados por el expedidor o el fabricante del producto, o los que se indican en las normas específicas relativas al producto. 3. En caso de transbordo de productos a granel, el responsable por la operación debe haber recibido capacitación específica sobre el tipo de mercancía.

En muchos casos, el dador de carga es quien deja explícito dentro del contrato de transporte que las únicas vías de tránsito serán a través de rutas nacionales, eligiendo aquellas que tengan mayor cobertura de personal y medios necesarios para dar respuesta a una emergencia. Esto conlleva una cuidadosa planificación de las rutas, que implica identificar a los diferentes organismos encargados de la respuesta a emergencias y facilitar su cooperación mediante la información técnica o la capacitación correspondiente. En otras ocasiones, el dador de carga llega a proporcionar cobertura con elementos o equipos específicos para la respuesta a emergencias con mercancías peligrosas. Finalmente, también ocurre que las partes involucradas (dador de carga, transportista y cliente) contratan a empresas especializadas en la respuesta a emergencias, asumiendo sus costos y proporcionando una ayuda indispensable. Aunque esto sucede en Argentina, donde existen empresas dedicadas a responder a emergencias con mercancías peligrosas, la extensión territorial abarcada por la empresa dadora de carga, o simplemente las largas distancias que recorren los camiones, dificultan mucho llevar adelante este tipo de respuesta si no se cuenta con el apoyo de los actores en el camino o en la ruta por donde circulan los vehículos.

Coordinación con autoridades y servicios de emergencias

La toma de decisiones estratégicas¹⁰ es el proceso que lleva a la selección de un curso de acción entre más de una alternativa. El desafío que conlleva este proceso en una crisis es frecuentemente subestimado o ignorado, excepto con el beneficio de la retrospectiva. Una buena toma de decisiones a nivel estratégico puede sacar a una organización de la crisis y llevarla al éxito futuro, mientras que las malas decisiones ciertamente exacerban una situación ya difícil y tienen impactos negativos a largo plazo sobre la reputación y el valor de la organización de respuesta a emergencias. En esencia, la respuesta ante las crisis conlleva una toma de decisiones basada en la mejor información disponible. Luego, es necesario convertir este camino elegido en dirección y acción, para que se controlen los acontecimientos y se minimicen los impactos de la crisis. Ahora bien, ¿cómo se toman las decisiones? La respuesta incluye una amplia gama de modelos de toma de decisiones que, en general, se organizan en torno a tres consideraciones principales:

1. Situación: ¿qué está sucediendo?, ¿cuáles son los impactos, los problemas y los riesgos?, ¿qué podría ocurrir y cuál es el abordaje al respecto? La conciencia situacional implica un adecuado conocimiento de estos factores.
2. Dirección: ¿qué estado final se desea?, ¿cuál es el propósito y los objetivos de la respuesta a la crisis?, ¿qué valores y prioridades generales van a informarla y guiarla?
3. Acción: ¿qué debe ser decidido y qué es necesario hacer para resolver la situación y alcanzar el final deseado? La efectividad de las acciones tiene que ser monitoreada y reportada.

9 Refiere a las fichas de intervención en caso de emergencia.

10 Extracto del capítulo 6 BS 11200:2014 (British Standard, 2014).

El modelo de decisión básico es el siguiente: analizar la situación, identificar los problemas, generar opciones, evaluar las opciones en relación con el estado final deseado y tomar una decisión o sostener una elección. Todas estas etapas deben ser coherentes con los valores y las prioridades estratégicas de la organización de respuesta a la emergencia.

¿Por qué la toma de decisiones en una crisis es desafiante? Los estudios muestran que en estos contextos no siempre se sigue un proceso claro. Por su naturaleza, se trata de situaciones en las que se crea un ambiente que potencialmente desvirtúa el procedimiento racional de la toma de decisiones en los niveles táctico y estratégico durante la respuesta a una emergencia.

Todos estos factores suponen extremas presiones psicológicas sobre el comando de incidentes en escena y el resto del personal afectado en toda la organización. Los altos niveles de incertidumbre que caracterizan a la mayoría de las crisis, causados por la falta de conocimientos y una plétora de rumores, suposiciones y desinformación, son particularmente amenazantes. La incertidumbre aumenta significativamente los niveles de estrés del tomador de decisiones, lo que puede afectar de forma negativa sus procesos cognitivos y aumentar la probabilidad de fallas. Los retos para una buena toma de decisiones son claros, pero incluso la superación de los desafíos no garantiza un resultado exitoso. Sin embargo, un conjunto de buenas prácticas en este sentido aumenta considerablemente la probabilidad de éxito en la respuesta a una emergencia.

La coordinación con autoridades y servicios de emergencia significa tomar decisiones cruciales en el momento de respuesta. Los líderes responsables deben contar con toda la información disponible para optar por el mejor camino. Esto incluye tanto a quienes están en la zona de intervención como a aquellos que gestionan otros servicios de emergencia: Defensa Civil, hospitales, escuelas, organismos nacionales, provinciales o municipales, entre otros.

La coordinación debe dejar de lado intereses políticos, institucionales o banales y enfocarse en la protección y el cuidado de las personas involucradas en la respuesta a la emergencia. Es esencial priorizar la seguridad de la población, quienes requieren orientación, liderazgo y un control eficiente de la situación. De no hacerlo, se compromete su imagen, lo cual disminuye su efectividad, su eficacia y la confianza de aquellos a quienes deben proteger.

De este proceso dependen muchas personas que, sin haberlo previsto, pueden verse afectadas por la negligencia, impericia o inobservancia de los procedimientos establecidos por ley para la respuesta a emergencias. No hay lugar para la especulación, la improvisación o el desapego de los estándares establecidos para manejar una crisis con mercancías peligrosas. La coordinación con las autoridades y los servicios de emergencia constituye otro pilar fundamental de la organización de respuesta.

Notificación a las autoridades competentes

En caso de un accidente vial, si el conductor está afectado de alguna manera o impedido físicamente, no podrá cumplir con la obligación establecida en el artículo 38 del anexo S del Decreto N.º 779/1995. Esta estipula que, en situaciones de emergencia, accidente o avería, tanto el fabricante como el transportista, el expedidor y el destinatario de la mercancía peligrosa deben proporcionar apoyo y brindar las aclaraciones requeridas por las autoridades. Por eso, el fabricante (dador de carga), el expedidor y el destinatario de la mercancía peligrosa deben involucrarse en la notificación a las autoridades nacionales, provinciales y municipales competentes.

Para este procedimiento, existen bases de datos o software, como la base de CATAMP-CIPET y el programa ECOFILE¹¹ mencionados en apartados previos, que permiten, mediante la posición geográfica, determinar a qué organismos se debe notificar. Estas herramientas proporcionan los números telefónicos y los lugares georreferenciados de las autoridades involucradas (ECOFILE). Además, ofrecen un servicio para el aviso y la respuesta a la emergencia (CITEP)¹². Sin embargo, es crucial conocer cómo se deben efectuar las demás comunicaciones durante una emergencia o crisis, ya que esto influirá directamente en el éxito o fracaso de la organización.

En el capítulo 7 de la BS 11200:2014 (British Standard, 2014), se proporcionan consideraciones importantes para la preparación y gestión de las comunicaciones en caso de una crisis o emergencia. Esto implica desarrollar y entregar un mensaje coherente que refleje la reacción de la organización ante la crisis, considerando lo que se sabe en ese momento y lo que se está haciendo respecto de los temas involucrados. Además, el mensaje debe abordar tanto las respuestas humanas como organizacionales.

Las comunicaciones de crisis eficaces colocan a la organización como la fuente central de información, tranquilizan a las partes interesadas y demuestran que la organización tiene control sobre la situación. Por lo tanto, estas

11 Para mayor información, visitar: <https://www.grupoeconat.com>

12 Para mayor información, visitar: <https://catamp.org.ar/CIPET/sobre-cipet/>

comunicaciones deben ser una parte integral de la respuesta organizacional a cualquier crisis y abarcar todos los medios de difusión. Asimismo, es necesario que se diseñen y suministren junto a la gestión de crisis y como respaldo de ella.

Preparación antes de la emergencia

Con las comunicaciones modernas, la información puede estar disponible en tiempo real y cada segundo que pasa se torna vital. Una buena preparación previa a la crisis permite a una organización responder de manera eficaz y transitar rápidamente de una fase reactiva a una proactiva. Para lograr esto, debe implementarse un plan de comunicación que establezca roles, responsabilidades y acciones para los miembros del equipo de comunicaciones y aquellos que los apoyan. Tienen que ensayarse todos los procesos de crisis para garantizar que los sistemas sean eficaces y que los equipos estén preparados.

Gestión de la reputación y las partes interesadas

Un aspecto clave de la gestión de la crisis es que los fundamentos de la gestión de la reputación se establezcan antes de que ocurra, generando así capital y confianza que luego pueden ser "utilizados" de manera efectiva durante el proceso. Una crisis puede dañar incluso previamente una reputación, y, en tal caso, el reto es el siguiente: a) garantizar que no se pierda totalmente y b) reconstruirla rápidamente.

La gestión de las partes interesadas es fundamental para el éxito de la reputación de la respuesta y para la percepción general de la eficacia de la organización. Es esencial identificar y considerar las necesidades y opiniones de todas las partes interesadas, incluyendo clientes, empleados, proveedores, autoridades y la comunidad en general.

El equipo de comunicaciones debe contar con una matriz de gestión para hacer el seguimiento de las partes interesadas. Esta matriz tiene que ser capaz de registrar quién ha hablado con cada parte, cuándo se realizó la comunicación y cuándo será la próxima. De esta manera, se asegura continuidad y eficacia, lo que contribuye a la construcción y el mantenimiento de una buena reputación durante y después de la crisis.

Roles clave

Los roles en el equipo de comunicaciones son cruciales para garantizar una gestión eficaz de la crisis y una comunicación clara. Estos pueden ser :

- Vocero.
- Jefe de comunicaciones.
- Funcionario responsable de prensa.
- Supervisión de medios.
- Supervisión de redes sociales.
- Receptores de llamadas.
- Comunicaciones internas.

La asignación de responsabilidades específicas asegura que todas las áreas clave estén cubiertas, desde la interacción con los medios hasta la supervisión de redes sociales. Además, resulta fundamental prepararse para manejar la información y las imágenes que circulan a través de "periodistas ciudadanos". Este paso tiene el fin de mantener el control sobre la narrativa y minimizar malentendidos. Otro aspecto crucial es la coherencia del mensaje. Cuando se establezca, el mensaje central debe compartirse uniformemente en la organización de respuesta a la emergencia. Este debe adaptarse al público general, respetando las prácticas habituales, la cultura organizacional y poblacional, y cumpliendo con las normativas legales para las comunicaciones con las autoridades nacionales, provinciales y municipales.

Todos los estudios destacan el grave error y el riesgo que implica censurar la información en caso de una emergencia que involucre mercancías peligrosas o potencialmente peligrosas. Aunque la realidad pueda ser desagradable o impactante, es preferible proporcionar un informe con datos fidedignos y exactos en lugar de dejar espacio a especulaciones o rumores. En situaciones extremas, ofrecer información precisa y oportuna actúa como un antídoto contra la exageración y las medias verdades, preservando así la credibilidad de las autoridades y de quienes brindan la información.

Saturar a la sociedad con noticias verídicas, sin importar su gravedad, y con instrucciones de autoprotección, resulta adecuado, ya que tiene un efecto tranquilizador. Al estar debidamente informada a través de comunicados oficiales de prensa, la población se libera del miedo y evita caer en especulaciones. Todo plan o norma básica para emergencias con mercancías peligrosas debe incluir la difusión de los siguientes tipos de información:

- Planes operacionales.
- Recursos disponibles, tanto personales como materiales.
- Responsables de controlar el incidente o accidente.
- Instrucciones sobre el comportamiento que debe adoptar la población.

Sin una adecuada comunicación antes, durante y después de la emergencia, las personas no podrán tomar decisiones efectivas, ya que la falta de información conducirá a acciones desordenadas e ineficaces. La sociedad debe estar informada sobre los impactos graves derivados de un accidente o incidente con mercancías peligrosas, así como sobre las causas, las probabilidades de repetición y cualquier otra situación de crisis. Por ello, todos los involucrados en la respuesta a la emergencia, especialmente en los niveles más altos de supervisión, deben coordinar la información que se brinda a las autoridades (nacionales, provinciales y municipales), a los medios de comunicación y en redes sociales. El objetivo es mantener bien informados a todos los habitantes, las instituciones, los vecinos y organismos implicados.

Evaluación y seguimiento de la situación

La finalización de una emergencia con materiales peligrosos requiere una evaluación y un seguimiento exhaustivos de las entidades involucradas en la respuesta. Este proceso debe llevarse a cabo con la presencia de un representante de cada institución, quien deberá contar con la información documentada, extraída de las acciones de respuesta. Esta información debe ser comparada con los planes operacionales que se analizaron previamente a la emergencia.

La finalidad principal es examinar las modalidades utilizadas, las prácticas llevadas a cabo y los roles asignados. Este proceso brinda una oportunidad para que la organización de respuesta realice un autoanálisis, requiriendo un alto nivel de flexibilidad y una evaluación honesta del rendimiento. Aunque el personal y las unidades seguramente desearon que todo se hubiese hecho perfecto, el análisis y la evaluación revelarán áreas de mejora que deben abordarse, sin importar posibles molestias o egos personales. Es fundamental que estas áreas se expongan y gestionen de manera constructiva, evitando encubrimientos para proteger la reputación de las personas o realidades incómodas.

La evaluación debe incluir un riguroso análisis que conduzca a una declaración de las lecciones identificadas y los datos necesarios para implementar acciones correctivas. Una vez realizadas las mejoras y correcciones, y probadas en evaluaciones o entrenamientos posteriores (simulacros), estas podrán considerarse como "lecciones aprendidas". Las actividades de evaluación y seguimiento deben manejarse con cuidado e incluir los siguientes elementos:

- a. Reuniones estructuradas.
- b. Evaluación de decisiones y su ejecución.
- c. Análisis del cumplimiento de objetivos.
- d. Identificación de lecciones aprendidas.
- e. Aplicación de lecciones aprendidas y comunicación.
- f. Integración de las lecciones en el programa de preparación para la respuesta a emergencias.

Los servicios de facilitadores externos especializados y observadores pueden ser utilizados tanto en eventos reales como en simulacros de escritorio y de campo. Los resultados de estos procesos deben conducir a un incremento en la capacidad del equipo, las habilidades individuales y la conciencia general. La formación y los ejercicios, tanto antes como después de una emergencia, deben ser parte de un proceso de desarrollo y mejora continua.

Conclusiones

En este artículo se delinearon los principales ejes que hay que tener en cuenta en cada una de las áreas claves de gestión de una crisis con materiales peligrosos. Responder a emergencias con mercancías peligrosas por carretera es muy importante y exige la colaboración y el compromiso de los actores involucrados. Solo mediante una planificación adecuada, una capacitación continua y una coordinación eficaz se podrá garantizar la seguridad en el transporte de sustancias peligrosas y minimizar los riesgos asociados con estas operaciones. Asimismo, son cruciales tanto la comunicación interna y externa como la autoevaluación de las acciones llevadas a cabo durante una crisis. El proceso de respuesta mejora de manera constante no solo a través del aprendizaje de aquello que funcionó, sino también mediante una correcta definición y análisis de los fallos.

Bibliografía

British Standard (2014). Crisis management. Guidance and good practice (BS 11200:2014).

Cámara Argentina del Transporte Automotor de Mercancías y Residuos Peligrosos; Centro de Información para Emergencias en el Transporte; Ministerio de Seguridad de la Nación (s/f). Manual de riesgos en el transporte de mercancías y residuos peligrosos.

Decreto N.º 779 de 1995 (Argentina).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (2009). Manejo de desastres, emergencias y programas para la continuidad de las actividades (IRAM-NFPA 1600).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2020). Seguridad y resiliencia. Sistemas de gestión de continuidad del negocio. Requisitos (IRAM-ISO 22301)

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2020). Seguridad y resiliencia. Sistema de gestión de continuidad del negocio. Guía para el uso de la norma IRAM-ISO 22301. (IRAM-ISO 22313).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2017). Seguridad de la sociedad. Evacuación masiva. Guía para la planificación (IRAM-ISO 22315).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2019). Seguridad de la sociedad. Sistemas de gestión de la continuidad del negocio. Guía para análisis del impacto en el negocio (IRAM-ISO TS 22317).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2018). Guía para la continuidad de la cadena de suministros (IRAM-ISO TS 22318).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2018). Seguridad y resiliencia. Resiliencia de la comunidad. Guía para planificar la participación de voluntarios espontáneos (IRAM-ISO 22319).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2018). Seguridad y resiliencia. Gestión de emergencias. Guía para la gestión de incidentes (IRAM-ISO 22320).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2017). Seguridad de la sociedad. Manejo de emergencias. Guía para alerta pública (IRAM-ISO 22322).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2017). Seguridad de la sociedad. Guía para los ejercicios (IRAM-ISO 22398).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2017). Seguridad de la sociedad. Guía para establecer acuerdos asociativos (IRAM-ISO 22397).

Instituto Argentino de Normalización y Certificación; Organización Internacional de Normalización (2014). Seguridad de la sociedad. Guía para la gestión de la preparación ante incidentes y la continuidad operacional (IRAM-ISO 22399).

Ley N.º 27.287 de 2016 (Argentina).

RESEÑA



Acacia Reber

Master en Administración de Empresas (MBA), especializada en Marketing y Liderazgo en la Universidad de Saint Joseph, Directora de Desarrollo Comercial y Marketing en ENSCO Inc.

reber.acacia@ensco.com

Mercancías peligrosas en el Centro Tecnológico del Transporte (CTT)

El transporte de materiales peligrosos es un aspecto crítico de las operaciones ferroviarias, que requiere estrictas medidas de seguridad para prevenir accidentes y mitigar los riesgos.

Situado en Pueblo, Colorado, Estados Unidos, el Centro de Tecnología del Transporte (CTT), propiedad de la Administración Federal de Ferrocarriles (Federal Railroad Administration - FRA) y del Departamento de Transporte de los Estados Unidos (U.S. Department of Transportation - USDOT), y gestionado por ENSCO, Inc., desempeña un papel fundamental en la mejora de la seguridad del transporte de mercancías peligrosas mediante pruebas avanzadas, formación e iniciativas de investigación.

Capacidades de ensayo avanzadas

Uno de los principales puntos fuertes del CTT son sus instalaciones de ensayo de última generación, que incluyen equipos especializa-

dos para simular y analizar diversos escenarios de colisión. Entre estas instalaciones, el muro de impacto (Figura 1) destaca como un recurso clave para probar la resistencia al choque de vagones cisterna y otros vehículos ferroviarios.

Este muro, construido con hormigón y acero, está diseñado para soportar impactos de hasta tres millones de libras, reproduciendo las condiciones que los vagones cisterna podrían enfrentar durante descarrilamientos o colisiones.

El CTT ha realizado numerosas pruebas con vagones cisterna para evaluar su resistencia a las perforaciones y otros daños. Para ello se utiliza un vagón único equipado con una masa pesada y una estructura de acero saliente (ram car), para simular escenarios de alto impacto. La naturaleza controlada y repetible de estas pruebas permite medir con precisión las velocidades, fuerzas, energías y ubicaciones de los impactos, lo que proporciona datos muy valiosos para mejorar el diseño de los vagones cisterna. Por ejemplo, las pruebas realizadas en el CTT contribuyeron al desarrollo de las especificaciones para vagones cisterna DOT-117 de EE. UU., que mejoran la resistencia a la perforación de los vagones que transportan líquidos inflamables.

Otra capacidad única del CTT son las pruebas a escala real de escenarios de descarrilamiento e impacto en pasos a nivel. Estos tests evalúan el rendimiento de diversos equipos de seguridad instalados en el material rodante utilizado para el transporte de mercancías peligrosas. Los datos recogidos durante las pruebas son un activo inestimable para el desarrollo de válvulas de cierre y descarga de seguridad, estructuras de protección y la construcción de las cisternas.

La Administración Federal de Ferrocarriles (FRA) realizó una prueba de impacto en el CTT a escala real en un paso a nivel entre un camión cargado y un vagón tanque de gas natural licuado (GNL) a 65 km/h. Esta prueba simula los requisitos de diseño de los contenedores de GNL de la norma M-1004 de la Asociación de Ferrocarriles Americanos (Association of American Railroads - AAR).

Como resultado del impacto, la estructura de la vía sufrió el desplazamiento de los durmientes y la torcedura de los rieles, lo que provocó el descarrilamiento de ambos bogies del vagón tanque y un bogie de la locomotora. Sin embargo, no se produjo ninguna perforación ni daño que provocara pérdida de combustible. Además, la válvula de seguridad se cerró con éxito,

Figura 1. Muro de impacto y ram car especialmente diseñados para diversos escenarios de pruebas de colisión



Fuente: CTT

demostrando la capacidad de cortar el suministro de combustible a la locomotora incluso después de un impacto en el vagón tanque. Esta prueba demostró que los vagones tanques de combustible no liberan combustible ni siquiera en condiciones de carga extremas.

Además de los vagones cisterna y los tanques de combustible, las instalaciones del CTT se han utilizado para probar la resistencia a los choques de los depósitos de combustible de las locomotoras. Estas pruebas reproducen situaciones reales como descarrilamientos, impactos laterales de vehículos y penetraciones de rieles rotos. La información obtenida en estos tests ha servido de base para la elaboración de reglamentos y normas, incluidos los establecidos por la FRA y la AAR.

El CTT es el lugar por excelencia para realizar pruebas a gran escala de resistencia a choques, explosiones e incendios, críticas para todo tipo de modos de transporte de superficie. Algunos ejemplos incluyen el uso del muro de impacto de hormigón, con una resistencia de tres millones de libras, para pruebas a escala real de vehículos y componentes. Estos tests incluyen impactos en vagones de pasajeros, vagones cisterna y tanques de combustible, con adquisición de datos a alta velocidad y captura de vídeo.

El CTT ha designado zonas de prueba de explosiones para el uso de hasta 500 TNT equivalentes, lo que permite probar equipos cargados con combustible real, incluido el hidrógeno. Además, el centro es idóneo para las pruebas de fuego, ya que cuenta con un cuerpo de bomberos propio, piscinas de pruebas de fuego y un túnel subterráneo para experimentos de explosiones, fuego y humo.

El centro también ofrece la posibilidad de realizar ensayos de transporte a escala real, algo difícil de conseguir en cualquier otro lugar del mundo. Esto incluye estudios dinámicos a gran escala o tests de subconjuntos importantes. Algunos ejemplos son las pruebas de locomotoras, vagones de pasajeros y vagones de carga en las más de 50 millas (80+km) de pistas de pruebas o con dispositivos de pruebas estáticas y dinámicas que acompañan a una instrumentación de adquisición de datos de primera clase, diseñada para evaluar vehículos de tamaño completo.

Además, el CTT puede probar componentes de infraestructura. Con más de 135 km² de terreno dedicado a pruebas de transporte de superficie, el centro cuenta con la capacidad para satisfacer las necesidades de pruebas a escala real de cualquier industria.

Modelado, simulación y formación

Además de las pruebas físicas, el CTT usa técnicas avanzadas de modelado y simulación para mejorar la seguridad. El Finite Element Analysis (FEA) o Análisis de Elementos Finitos se utiliza habitualmente para reproducir escenarios de colisión y validar los resultados de las pruebas físicas. Combinando el FEA con los datos de las pruebas de impacto, el CTT puede realizar simulaciones exhaustivas que proporcionan una visión más profunda del comportamiento de los vehículos ferroviarios en diversas condiciones. Este enfoque no sólo reduce la necesidad de pruebas físicas,

sino que también acelera el desarrollo de diseños más seguros.

Las simulaciones de gemelos digitales ofrecen un enfoque holístico de las pruebas mediante la creación de un modelo virtual de un activo físico, que puede utilizarse para predecir el rendimiento y optimizar los diseños antes de su aplicación real. Algunos ejemplos son VAMPIRE, que se utiliza para modelar la dinámica de vehículos ferroviarios, el Train Energy and Dynamics Simulator (TEDS), que se emplea para simulaciones de la dinámica de vías y trenes, y el Finite Element Analysis (FEA), que utiliza varios paquetes, como ANSYS y LS-DYNA, para simular la respuesta estructural y los fallos. Esto permite combinar las pruebas físicas y la simulación para obtener los mejores resultados.

El CTT es reconocido a nivel internacional por sus completos programas de formación, que dotan al personal de las habilidades y conocimientos necesarios para responder eficazmente a los incidentes con mercancías peligrosas. Estos programas se llevan a cabo en colaboración con socios del sector, entre ellos Ambipar, líder en formación de respuesta a emergencias. El Ambipar Response Training Center (ARTC) del CTT ofrece una serie de escenarios de emergencia simulados que proporcionan experiencia práctica en un entorno controlado.

Los programas de formación del centro cubren un amplio espectro de situaciones de emergencia, desde descarrilamientos de trenes hasta accidentes de carretera. Los participantes se someten a un riguroso entrenamiento que incluye la respuesta a condiciones de fuego real bajo la supervisión de instructores cualificados y personal de seguridad. La posibilidad de entrenarse en escenarios realistas garantiza que los técnicos estén bien preparados para hacer frente a emergencias reales.

A medida que evoluciona el sector del transporte, también lo hacen las

Figura 2. Entrenamiento de respuesta a incendios



Fuente: CTT

Figura 3. Ensayo con personal especializado



Fuente: CTT

necesidades de formación. El CTT fue incorporando programas de capacitación especializados para la gestión de incidentes relacionados con el combustible de hidrógeno y las baterías de litio. Estas formaciones abordan los retos específicos que plantean dichas fuentes de energía, garantizando que los técnicos estén bien equipados para gestionar los riesgos asociados.

Asegurar la seguridad durante las operaciones de formación y ensayo es primordial. El CTT cuenta con un cuerpo de bomberos especializado, formado por personal altamente cualificado y dotado de los equipos de extinción de incendios más modernos. Este personal desempeña un papel crucial en la supervisión de los protocolos de seguridad, la planificación de estrategias de respuesta ante emergencias y la prestación de apoyo inmediato durante las pruebas. Su participación ejemplifica el compromiso del centro de mantener los más altos niveles de seguridad.

Colaboración con Ambipar

Como se mencionó previamente, las capacidades del CTT se ven reforzadas por la colaboración con socios industriales como Ambipar. Esta empresa es mundialmente reconoci-

da por la formación que ofrece para la respuesta ante emergencias con mercancías peligrosas. Su mayor campo de entrenamiento se encuentra en el ámbito del CTT. Ambipar se adhiere a las normas internacionales para la formación de personal de respuesta y utiliza instalaciones y tecnologías de vanguardia para preparar a los técnicos de hoy ante las necesidades cambiantes de las emergencias de mañana.

La empresa ofrece una amplia gama de programas de formación, entre los que se incluyen Operaciones HazMat, Técnico HazMat, Especialista en vagones cisterna, Especialista en autopistas, Especialista en tanques intermodales, Especialista en gases tóxicos, Especialista en gases inflamables, Especialista en retirada de productos, Especialista en criogenia, Gestión de emergencias, Emergencia en baterías de litio, Emergencia en hidrógeno, Emergencia en tanques de almacenamiento, Emergencia en terminales de carga y descarga, Emergencia en tuberías, Emergencia en espacios confinados Hazmat y muchos más. Estos programas proporcionan experiencia práctica con tanques y tuberías de transporte reales y plenamente operativos, así como con equipos de respuesta de última generación. Ambipar opera cinco campos de

entrenamiento, incluyendo el ARTC USA, con instalaciones en Brasil (Nova Odessa - São Paulo), Chile (Santiago de Chile) y Perú. Los centros de formación de Ambipar cuentan con una amplia gama de contenedores actuales y equipos y tecnologías de respuesta modernos. Esto garantiza que los técnicos reciban formación en las últimas tecnologías y herramientas disponibles en la actualidad.

El nuevo centro de formación de Ambipar en el CTT se enorgullece de ofrecer una experiencia de formación de primera clase en respuesta a emergencias con mercancías peligrosas, basada en el conocimiento práctico y en métodos de aprendizaje innovadores.

Orientaciones futuras

De cara al futuro, el CTT sigue comprometido con el avance de la seguridad ferroviaria a través de la innovación y la investigación continua. El cambiante panorama del uso de la energía, que incluye el hidrógeno, el gas natural renovable (GNR) y los sistemas de almacenamiento de energía en baterías, presenta nuevos retos y oportunidades. El centro participa activamente en el desarrollo y ensayo de diseños de resistencia a los choques para estas fuentes de energía alternativas, garantizando que las normas de seguridad sigan el ritmo de los avances tecnológicos.

En conclusión, el CTT desempeña un papel vital en la garantía de la seguridad del transporte de mercancías peligrosas a través de sus avanzadas instalaciones de ensayo, sus programas de formación práctica y sus asociaciones de colaboración. Mediante la combinación de pruebas físicas, modelado y simulación, y formación integral, el centro proporciona un enfoque holístico de la seguridad ferroviaria que beneficia a toda la industria. A medida que el transporte ferroviario siga evolucionando, el compromiso del CTT con la seguridad y la innovación seguirá siendo la piedra angular de su misión.

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

Desarrollo de dispositivos de ensayos ambientales para picosatélites suborbitales

Development of environmental test devices for suborbital picosatellites

Pablo M. González

Ingeniero mecánico, docente de la UTN FRH e investigador del GTA (Grupo de Tecnología Aeroespacial)

Agustín Buffa

Estudiante de Ingeniería aeronáutica/aeroespacial (UTN)

Lucas Zabala

Ingeniero aeronáutico/aeroespacial (UTN)

GTA – Grupo de Tecnología

Aeroespacial. Dirigido por Nahuel M. Castello, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo, Buenos Aires, Argentina.

gta@frh.utn.edu.ar

Palabras clave: Ensayos Ambientales, Picosatélites, CANSAT.

Keywords: *Environmental Testing, Picosatellites, CANSAT.*

Ponencia presentada en el XII Congreso Argentino de Tecnología Espacial. 12-14 de abril, 2023.

*Recibido: 16/06/24
Aceptado: 01/07/24*

Resumen

Los ensayos ambientales son la reproducción de forma fiel en un laboratorio de ensayos de las condiciones ambientales a las que van a estar sometidos los diferentes componentes y elementos de una carga útil espacial. La realización de ensayos ambientales permite adelantarse a los inconvenientes y solucionarlos antes de la ejecución de su misión. El Grupo de Tecnología Aeroespacial de la Universidad Tecnológica Nacional tuvo a su cargo la construcción de dispositivos para ensayar los picosatélites CANSAT en el primer certamen nacional de cargas útiles.

Abstract

Environmental testing is the faithful reproduction in a test laboratory of the environmental conditions to which the different components and elements of a space payload will be subjected. The performance of environmental tests makes it possible to anticipate and solve problems before the execution of the mission. The Aerospace Technology Group of the National Technological University was in charge of the construction of devices to test the CANSAT picosatellites in the first national payload competition.

Introducción

El proyecto CANSAT en Argentina intenta reproducir a escala todo el proceso por el cual se diseña un satélite, se lo construye, prueba, lanza y opera. Esta metodología tiene su origen en los Estados Unidos de América, donde un docente y un grupo de académicos propusieron elevar una carga útil cuyo tamaño no superara al de una lata de refrescos. Tuvo un éxito enorme en todo el mundo, a tal punto que se convirtió en una competencia anual universitaria y fue respaldado por las principales agencias espaciales (NASA, European Space Agency-ESA, Japan Aerospace Exploration Agency-JAXA, entre otras).

En nuestro país, la Asociación de Cohetería Experimental y Modelista de Argentina adoptó el modelo para la escuela media y en el año 2004 lanzó la primera prueba. La Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CNAE) se interesó en el programa y efectuó una prueba piloto con mucho éxito en el año 2011.

Un CANSAT (*can*: lata; *sat*: satélite) es un dispositivo autónomo que emula ser un satélite. Se lanza en un cohete u otro medio de elevación hasta una altura aproximada de 300 metros. Se intenta que el tiempo en el aire represente el tiempo de visibilidad sobre el horizonte de una pasada de satélite, típicamente de pocos minutos. Debe realizar una misión definida de manera previa. Debido a su espacio de uso, es ideal para mediciones atmosféricas y experimentación científica.

Los ensayos ambientales se plantean en forma didáctica como un acercamiento lo más fiel posible al ciclo de pruebas a las que son sometidas las cargas útiles antes del vuelo, para garantizar su vida.

Metodología

En la industria aeroespacial existen numerosos ensayos para comprobar el funcionamiento de los componentes, elementos y/o del producto completo. Para el certamen CANSAT se realizaron tres ensayos ambientales: ensayo de caída (*drop test*), ensayo de vacío térmico (*thermal vacuum test*) y ensayo de vibración (*vibration test*). Esta serie de pruebas están recomendadas por la NASA para su competencia internacional universitaria [1]. A continuación, se describen brevemente:

- **Ensayo de caída:** está diseñado para verificar si el picosatélite y el punto de fijación con el paracaídas sobrevivirán al despliegue y caída, las cuales pueden ser muy violentas
- **Ensayo de vacío térmico:** verifica que la carga útil pueda operar a los cambios de temperaturas que



se presentan durante la fase de ascenso. Debido a la disminución de la presión con la altura, también se verifica el despliegue de la operación de la carga útil y que todos sus componentes funcionen con normalidad.

- **Ensayo de vibraciones:** comprueba la integridad del montaje de todos los componentes, las conexiones, las partes estructurales y la batería. [2]

Los estándares de la NASA, adoptados por la ESA y la CONAE [3], establecen lo siguiente:

- **Ensayo de caída:** consiste en el despliegue de la carga útil desde una distancia de 900 mm que simula la caída real, alcanzando una velocidad igual a la que se tendría con el paracaídas, típicamente entre 2 y 4 m/s. Se propone una estructura de perfiles de aluminio con los cuales se regula la altura, en donde se tiene un mecanismo de despliegue controlado.
- **Ensayo de vacío térmico:** si bien por los estándares se sugiere realizar estos ensayos por separado -a fin de que sea más real la simulación en vuelo-, se hicieron en forma simultánea. Se realiza una disminución de presión con una bomba de vacío, alcanzando los 0,8 bar y, mediante una celda Peltier, se enfría el entorno a través de una pared de aluminio para bajar 3° C respecto a la temperatura ambiente; esto se lleva a cabo de manera lenta y no de forma similar a la tasa de ascenso del cohete.
- **Ensayo de vibración:** según los lineamientos, para este ensayo se propuso una solución sencilla: la de utilizar una lijadora orbital que lleve a una exposición de 22 g en la carga útil. Para mejorar el ensayo se plantea su utilización controlando el motor con un variador de voltaje, a modo de regular la frecuencia. Se vincula una placa de aluminio donde se sitúa el CANSAT, siendo este soportado por mordazas diseñadas por el Grupo. La obtención de resultados se da por dos acelerómetros, uno para la placa y otro para la carga en sí misma, controlados por una placa tipo Arduino.

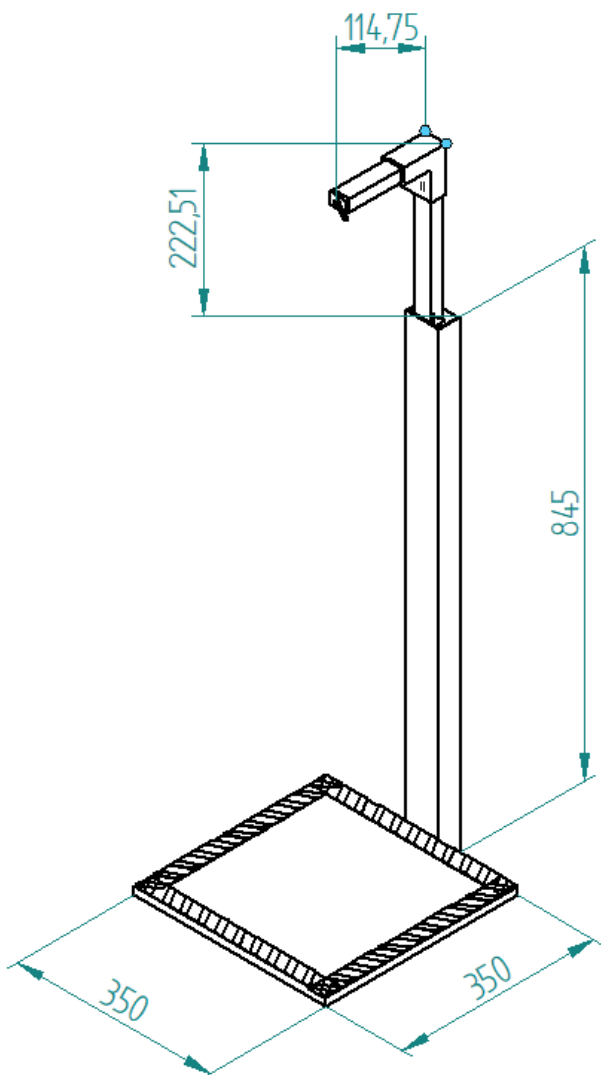
Desarrollo

Se desarrollaron tres dispositivos para la realización de los ensayos, los cuales son:

- Dispositivo para ensayo de caída
- Cámara de vacío térmico
- Shaker para ensayo de vibración

A. Dispositivo para ensayo de caída

Figura 1. Esquema con dimensiones del dispositivo de ensayo de caída (en mm)



Elementos:

- Plataforma de fibra de densidad media (MDF)
- Columna de aluminio
- Sistema de liberación con Arduino
- Piezas para la conexión entre elementos estructurales elaboradas en PLA
- Servomotor

“Un CANSAT es un dispositivo autónomo que emula ser un satélite. Se lanza en un cohete u otro medio de elevación hasta una altura aproximada de 300 metros”



Figura 2. El dispositivo de ensayo de caída en el LAyF de la UTN FRH

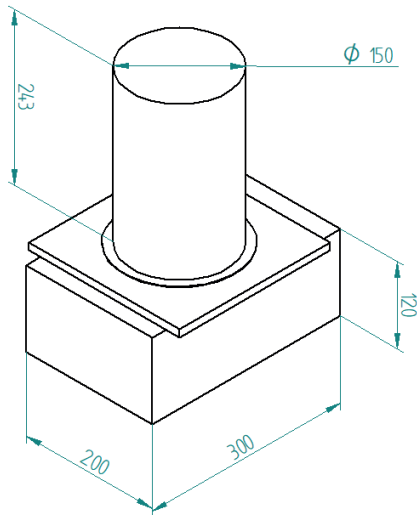


La plataforma de MDF es la base del dispositivo. En la zona de impacto del CANSAT, la columna de aluminio consta de un perfil tipo C (soporte principal) y, dentro del mismo, un tubo rectangular que se desliza dentro del perfil tipo C para regular la altura de caída. Con las piezas elaboradas en ácido poliláctico (PLA) con tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling* o *Manufactura por Deposición Fundida -impresión 3d-*), se realizó un carril para el deslizamiento del tubo rectangular y para unión del brazo que sujeta el sistema de liberación. Este sistema se construyó con un servomotor controlado por una placa tipo Arduino que, mediante dos botones, hace girar una palanca y se libera el CANSAT.

El sistema de liberación está preparado para tres velocidades de caída, aunque se utilizó solo la altura más baja, que implica una velocidad de caída de 2 m/s aproximadamente. El dispositivo prevé un alojamiento para el picosatélite, a fines de contenerlo ante una eventual rotura en la caída.

B. Cámara de vacío térmico

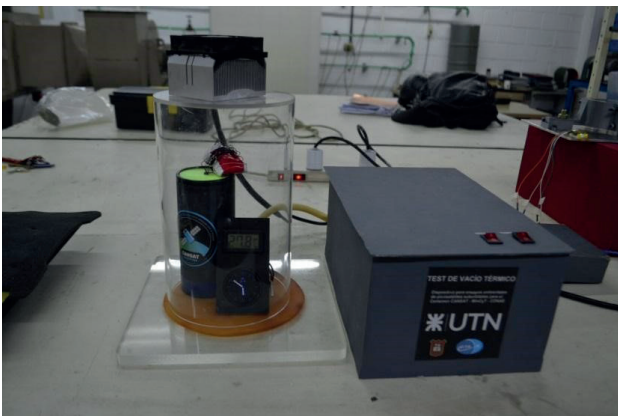
Figura 3. Esquema con dimensiones del dispositivo de ensayo de vacío térmico (mm)



Elementos:

- Bomba de vacío
- Barómetro
- Termómetro
- Cámara hermética
- Piezas para sujeción del barómetro elaboradas por impresión 3D (en poliéster de glicol-PET G)
- Celda Peltier
- Cooler
- Teclas on/off
- Caja de MDF

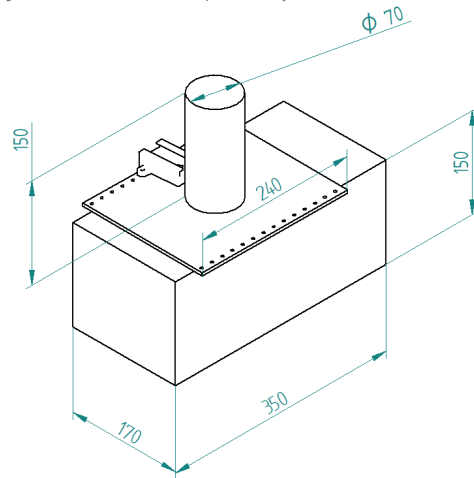
Figura 4. El dispositivo de ensayo de vacío térmico en el Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos (LAF) de la UTN FRH



Dentro de la caja MDF se colocó la bomba de vacío con las teclas de encendido, que a su vez está conectada mediante una manguera a la cámara de vacío. Además, para reducir la temperatura se encimó a la cámara una celda Peltier refrigerada por un cooler. Para aumentar la efectividad, se dispuso de una placa de aluminio en contacto con la celda. Dentro de la cámara se encuentran el termómetro y el barómetro, colocados en piezas elaboradas en PLA con tecnología FDM.

C. Shaker

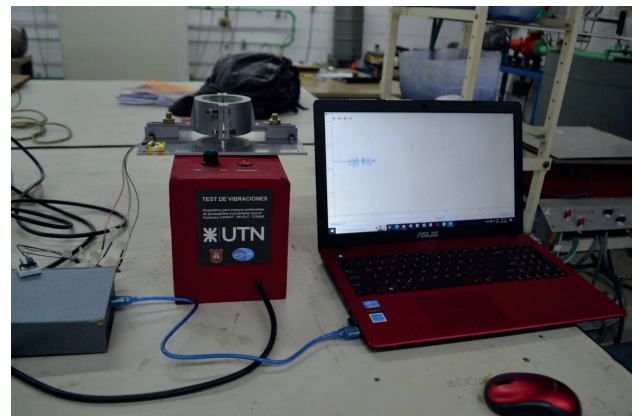
Figura 5. Esquema con dimensiones del dispositivo de ensayo de vibraciones (en mm)



Elementos:

- Lijadora orbital
- Regulador de voltaje
- Caja contenedora con MDF
- Base con placa de aluminio
- Fijadores elaborados en PLA
- Acelerómetros de unidad de proceso múltiple (Multi-Round Units-MPU)
- Notebook para la visualización de las mediciones de los acelerómetros
- Tecla on/off
- Placa Arduino UNO

Figura 6. El dispositivo de ensayo de vibraciones en el LAF de la UTN-FRH



Se construyó la caja con MDF para contener la lijadora orbital, la tecla de encendido y el regulador de voltaje. Este último permite variar la frecuencia de oscilación; también la caja funciona como base del dispositivo. Por otro lado, la placa Arduino UNO se conectó a la notebook para graficar las mediciones realizadas por los acelerómetros MPU, uno de los cuales se adhirió a la base del dispositivo y otro, al CANSAT.

Ensayos de laboratorio

En el LAyF, se practicó un *dry run* de los dispositivos con un *dummy*, simulando un CANSAT propiamente dicho. De esta forma, se aseguró el correcto funcionamiento de los dispositivos. Luego de los ensayos, se llegaron a conclusiones y correcciones para un correcto comportamiento en el Centro Espacial Teófilo Tabanera (CETT).

Dispositivo para ensayo de caída

Debido a que la velocidad de impacto era muy alta, dada la dureza de la base, y que esta no representaba de forma acorde el suelo de tierra, se disminuyó la altura a efectos de no comprometer la integridad de los dispositivos.

Cámara de vacío térmico

Se constató que su comportamiento fuera el esperado, y como no existieron mayores complicaciones tanto en funcionamiento como en la prueba en sí del *dummy*, no hubo correcciones a tener en cuenta.

Figura 7. Ensayo de un prototipo de CANSAT

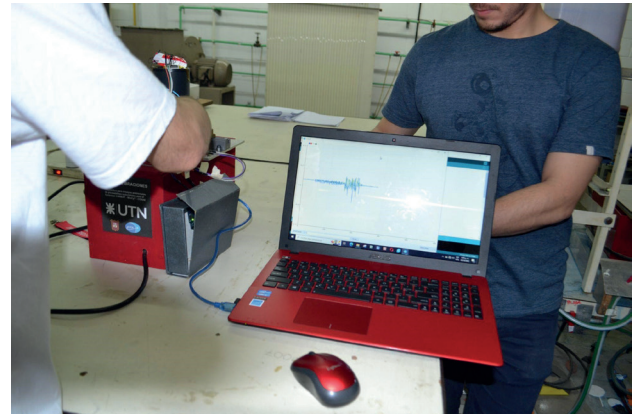


Shaker

Como antes detallamos, se usaron dos acelerómetros: uno para la base y otro en la carga útil. Se observó que existe un rango operativo: en el extremo inferior, el motor no consigue vencer la inercia del conjunto; en cambio, en el superior, la frecuencia aumenta con la amplitud, por lo que las vibraciones hacen que no sean practicables para el ensayo. Entonces no se utilizaron

valores extremos del dial de regulación, sino aquellos que arrojaban aceleraciones del orden esperado para el lanzamiento y separación, típicamente entre 6 y 9 g.

Figura 8. Ensayo de vibraciones



Pruebas de campo

En la campaña de lanzamientos de los picosatélites, se pusieron a prueba los dispositivos. Los cinco equipos finalistas realizaron los siguientes procedimientos:

- **Fit check:** se verificaron pesos y medidas para confirmar que se encontraban dentro de las especificaciones del certamen: 150 mm de largo por 70 mm de diámetro y menos de 300 gr de peso.
- **Prueba de vibración:** se ensayaron en el *shaker* los cinco picosatélites durante algunos segundos, para simular las vibraciones de la etapa de despegue, aceleración y liberación. El rango de frecuencias armónicas probadas y su duración intentaron reflejar estos eventos. Las aceleraciones obtenidas oscilaron entre 4 y 10 g durante tres segundos. Se realizaron series de cinco pruebas para garantizar el funcionamiento. Durante el transcurso de las pruebas, el CANSAT debía estar en modo operativo, transmitiendo los datos a la Estación Terrena.

Figura 9. Ensayo de las vibraciones de su CANSAT

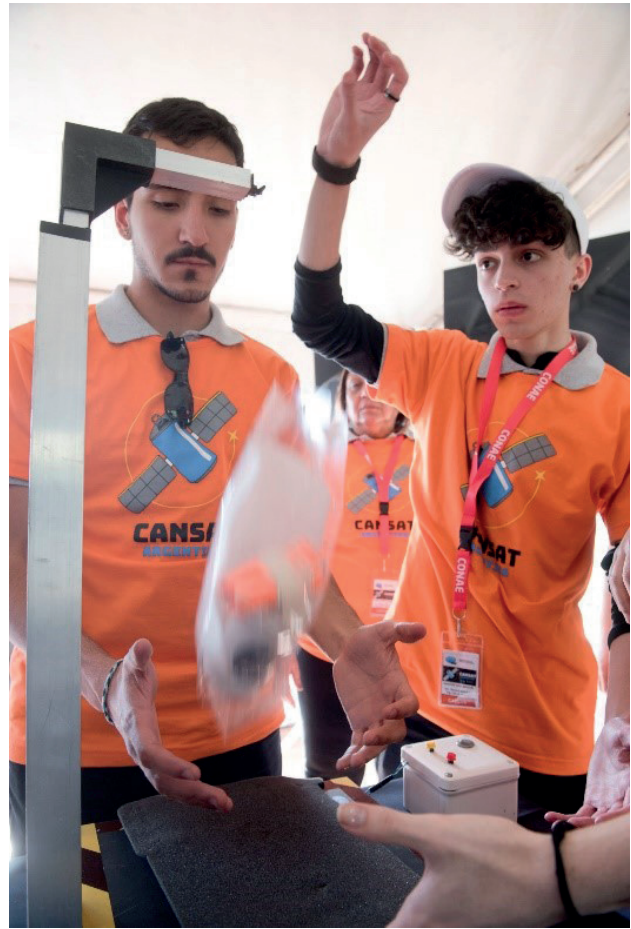


- **Prueba de vacío térmico:** una vez finalizado el primer ensayo, sin apagar los satélites, se introdujeron en la cámara de vacío térmico, practicando un vacío equivalente al triple de la altura que alcanzarían en vuelo (en el orden de 0,8 bar) y disminuyendo dos grados la temperatura dentro de la cámara. Se realizó un solo test de este tipo por equipo.
- **Drop test:** último ensayo que representaba la fase final del vuelo. Tal como se había realizado en el LAyF, la altura de lanzamiento fue la más baja (900 mm), para no dañar los satélites antes del vuelo. Una falla en la electrónica del sistema de liberación obligó a lanzar manualmente cada uno.

Figura 10. Ensayo de vacío térmico en el CANSAT



Figura 11. Ensayo de la caída del CANSAT



Conclusiones

Los dispositivos y los ensayos realizados son el puntapié que nos permite ver la complejidad que representa el estudio de las condiciones ambientales, no solo en la construcción de dichos dispositivos, sino también en que las mediciones sean confiables. Además, es necesario un análisis para seleccionar adecuadamente los elementos requeridos para lograr los parámetros ambientales a los que estará sometido el CANSAT. Considerando el tiempo de diseño, desarrollo y fabricación, los dispositivos cumplieron satisfactoriamente con lo esperado. Se busca mejorar los gabinetes donde se encuentra el hardware, como

también mejorar la *performance* de los mismos, por ejemplo, el método de refrigeración del ensayo de termovacío.

Referencias

- [1] NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. (2022). *NASA Student Launch- Handbook and Request for Proposal*. Marshall Space and Flight Center – Huntsville, Alabama.
- [2] HARRIS G. (2002). *Shock and Vibration Handbook – 5th Edition*. McGraw Hill Vol.2, 121-153.
- [3] GRUPO DE TECNOLOGÍA AEROESPACIAL (2022). *Environmental Testing Requirements*. Convenio específico CONAE-UTN.

Método de análisis de los riesgos de accidente en los pasos a nivel para mejorar la seguridad operacional ferroviaria

Level crossing accident risk analysis method to improve railroad operational safety

Pedro Paulo Ferreira Peron
<https://orcid.org/0000-0003-0619-4507>
Mariana Verbena Casella
<https://orcid.org/0000-0002-5206-8723>
Aldrei Camille Max Skwarok
<https://orcid.org/0000-0002-6104-9647>
Renata A. de Mello Bandeira
<https://orcid.org/0000-0002-2776-2473>
Vânia Barcelos Gouvêa Campos
<https://orcid.org/0000-0002-3206-168X>
Orivalde Soares da Silva Junior
<https://orcid.org/0000-0003-0743-8024>

Sección de Enseñanza de Ingeniería de Fortificación y Construcción. Ingeniería de Transporte, Instituto Militar de Ingeniería, Brasil.

Edición en portugués: «Método De análise Dos Riscos De Acidentes Em Passagens Em nível Objetivando O Aumento Da segurança Operacional ferroviária». Revista Transporte y Territorio, n.º 28 (junio 2023), 122-41.

<https://doi.org/10.34096/rtt.128.10395>

Recibido: 05/07/24
Aceptado: 08/07/24

Resumen

Este artículo propone un método para analizar los riesgos de accidentes existentes en los pasos a nivel de las vías férreas brasileñas. Se realizó un análisis de las normas nacionales e internacionales para identificar los principales criterios utilizados para clasificar el tipo de riesgo y definir el tipo de señalización que se debe utilizar para aumentar la seguridad de estos cruces. Con base en los resultados del análisis, se desarrolló una metodología y se aplicó a la red ferroviaria de la región sudeste del país. Los datos obtenidos muestran que las inversiones en señalización tuvieron resultados positivos. Además, esta reducción de accidentes permitió el aumento de la velocidad máxima autorizada (VMA) en el tramo estudiado, lo que generó un menor impacto en el tráfico, ya que los pasos a nivel se despejan más rápidamente. Esto garantiza beneficios tanto para la operación ferroviaria como para la población que necesita cruzar en estos puntos, reduciendo el ruido emitido por el tráfico y la necesidad de mantenimiento de locomotoras y vagones.

Abstract

This article proposes a method for analyzing the risks of accidents at level crossings on Brazilian railroad tracks. An analysis of national and international standards was conducted to identify the main criteria used to classify the type of risk and define the type of signaling that should be used to increase the safety of these crossings. Based on the results of the analysis, a methodology was developed and applied to the railway network in the southeastern region of the country. The data obtained shows that investments in signaling had positive results. In addition, this reduction in accidents allowed for an increase in the maximum authorized speed (MAS) in the section studied, which generated a lower impact on traffic, since the level crossings are cleared more quickly. This ensures benefits for both the railway operation and the population that needs to cross at these points, reducing the noise emitted by traffic and the need for maintenance of locomotives and wagons.

Palabras clave: Pasos a Nivel, Seguridad Operacional, Gestión de Riesgos, Accidentes Ferroviarios, Señalización Activa y Pasiva.

Keywords: Level Crossing, Safety, Railway Accidents, Risk Management, Active and Passive Signaling.

Introducción

La realización de cualquier actividad, incluso con cautela, conlleva riesgos, y una de las mejores formas de manejarlos es evitarlos (Furtado, 2012). Evitar que los riesgos se conviertan en accidentes está relacionado con la inversión en prevención, la gestión de factores y causas, así como la toma de conciencia sobre las mejores prácticas y actitudes en cualquier actividad. Por lo tanto, una organización necesita estar preparada para situaciones que impliquen riesgos, capacitar a sus empleados y disponer de documentos que orienten sobre cómo deben proceder, utilizando conceptos y herramientas de gestión de riesgos (Silva, 2010).

En el sistema de transporte ferroviario, los riesgos existentes pueden estar relacionados con los siguientes factores: fallo humano o funcional (debido al comportamiento de las personas implicadas), material rodante (estado operativo de los vehículos, como locomotoras o vagones), vía principal (características de la vía, infraestructura, superestructura, señalización y entorno) y factores legales, sociales o institucionales (características de la comunidad circundante o aspectos relacionados con la regulación e inspección) (Ribeiro, 2011). Por lo tanto, la prevención y gestión de los factores de riesgo en el transporte ferroviario están vinculadas a la evaluación de todas las dimensiones mencionadas, así como al tipo de carga transportada (Areosa, 2012).

En comparación con otros modos de transporte, el ferrocarril presenta ventajas en lo que respecta a los riesgos debido a la presencia de vías de dominio propio, el control del tren y del producto transportado, un sistema de comunicación propio, la existencia de planes de respuesta en caso de accidente, de equipos de rescate especializados, de técnicos en seguridad y medio ambiente, etc. (Ferreira y Almeida, 2006).

Los accidentes ferroviarios representan uno de los principales riesgos asociados a este modo de transporte, ya que generan numerosos inconvenientes: costos de reparación de la vía y del material rodante dañado, pérdida de mercancías en caso de vuelco de vagones, costos de operación debido a la interrupción del tráfico; se trata de factores que, en áreas metropolitanas, afectan a la población local (Ribeiro, 2011).

Esta situación se agrava especialmente cuando los accidentes involucran mercancías peligrosas, que pueden ser agresivas para los seres vivos y el medioambiente en general. Además, estos incidentes afectan directamente la imagen de las empresas y su capacidad para obtener nuevos contratos, ya que repercuten en los clientes, la comunidad y el medioambiente. También son indicadores vigilados de cerca por la Agencia Nacional de Transportes Terrestres (ANTT), lo que puede acarrear consecuencias como multas y la prohibición de renovación de concesiones.

Según Hauer (1997), podemos definir la seguridad de una entidad a partir del número y tipo de accidentes, así como su gravedad, que se espera ocurran durante un período específico. Más del 60 % de los accidentes ferroviarios en Brasil ocurren en cruces entre vías férreas y rutas o calles (pasos a nivel), siendo la principal causa la imprudencia de conductores y peatones (ANTT, 2015).

La Resolución N.º 5902 (ANTT, 2020) refuerza que algunos de los principales tipos de accidentes ferroviarios son: atropello en pasos a nivel, cuando hay colisión entre un vehículo ferroviario y un ser humano; y colisión en pasos a nivel, cuando hay colisión entre un vehículo ferroviario y otro no ferroviario.

El Código Nacional de Tránsito (CNT), por la Ley N.º 9503/1997, define un paso a nivel (PAN) como "todo cruce entre una carretera y una línea ferroviaria o tranviaria con vía propia", que puede ser a nivel, cuando el paso se produce al mismo nivel, o a desnivel, cuando el cruce se produce con un paso inferior (túneles, por ejemplo) o superior (como los viaductos) (JUSBRASIL, 2020).

Según datos de 2008 de la Agencia Nacional de Transportes Ferroviarios (ANTF), había 12.273 pasos a nivel catalogados a lo largo de 29.817 km de líneas ferroviarias en Brasil (Peron, 2016). Estas intersecciones entre carreteras y ferrocarriles comprometen la velocidad de circulación de los trenes y, consecuentemente, la capacidad de transporte de las concesionarias ferroviarias. Se consideran un "cuello de botella logístico" porque interfieren en la circulación de los trenes, los cuales mayoritariamente transportan commodities hacia los puertos (Castillo, 2007).

Además, los pasos a nivel ferroviarios presentan un alto riesgo de accidentes, exacerbado por el volumen de tráfico en ambos sistemas y su ubicación (Carmo, Lopes y Campos, 2012). Debido a que la mayoría de los ferrocarriles brasileños tienen más de cien años, las ciudades han crecido muy cerca de las vías, lo cual afecta la seguridad operacional.

Para prevenir accidentes, corresponde a las concesionarias ferroviarias, responsables de la creación de los PAN, implementar la señalización correspondiente. Son responsables de cualquier deficiencia, insuficiencia o instalación incorrecta de dicha señalización (JUSBRA-SIL, 2020). Sin embargo, es importante destacar que, además de estas medidas, el apoyo de los poderes públicos y de la sociedad en general es fundamental para reducir el número de accidentes.

En este contexto, el presente artículo aborda el análisis de los riesgos específicamente relacionados con los accidentes en pasos a nivel de una concesionaria ferroviaria. Se ha desarrollado un método para analizar estos riesgos, basado en el estudio detallado de la reglamentación nacional e internacional sobre el tema. El método propuesto ofrece ventajas respecto a las evaluaciones actuales en el país al incluir, además de la normativa vigente, el análisis de la visibilidad como un elemento crucial en el proceso de toma de decisiones. También define un enfoque para priorizar la atención en aquellos casos donde se analizan múltiples pasos a nivel. A su vez, el método propuesto no se limita a su implementación en nuevos PAN, sino que también puede aplicarse para mejorar la seguridad en los ya existentes.

Este enfoque se aplicó a la red de un operador ferroviario de Brasil y se analizaron los indicadores de accidentes en los lugares donde se adoptaron medidas preventivas, teniendo en cuenta la gravedad de los riesgos y las causas identificadas en el historia de accidentes. Así, se mapearon las acciones preventivas empleadas y se evaluó la eficacia de su implementación para el periodo que va de 2014 a 2019.

Pasos a nivel

Las soluciones potenciales para prevenir accidentes en los pasos a nivel, responsabilidad de las concesionarias ferroviarias, están relacionadas con la implementación de la señalización adecuada en estos lugares, conforme a su clasificación. A continuación, se presentan las regulaciones y clasificaciones de los pasos a nivel ferroviarios en Brasil y en el extranjero.

Reglamentación y clasificación de los pasos a nivel

A nivel internacional, los criterios utilizados para identificar los PAN se clasifican en función de varios aspectos clave: condiciones físicas, condiciones de tráfico, condiciones operativas, comportamiento humano e historial de accidentes.

La Tabla 1 resume los criterios adoptados en Estados Unidos (EE. UU.), Australia y Canadá para clasificar sus PAN. La elección de estos tres países se debe a su similitud con Brasil en términos de tipo de carga, volumen transportado y tamaño del territorio, así como por la importancia del ferrocarril en sus matrices de transporte. El modelo europeo no se incluyó en el análisis debido a diferencias significativas, como el tamaño más reducido de los países y un enfoque más centrado en el transporte de pasajeros.

En Brasil, según el Código Nacional de Tránsito (CNT), los ferrocarriles no pueden impedir que las carreteras crucen sus líneas, y estos cruces deben preferiblemente realizarse a desnivel. Sin embargo, debido al gran número de PAN existentes en el país, resulta inviable que todos ellos se conviertan en pasos a desnivel debido a la alta inversión necesaria y a la limitada disponibilidad de recursos para llevar a cabo este tipo de obras.

El principal problema que afecta a los PAN en Brasil está directamente relacionado con su regulación (Peron, 2016). No existe una definición clara de las responsabilidades en cuanto al mantenimiento e instalación de sistemas de seguridad. Las normas de clasificación, que deberían ayudar a identificar las soluciones más adecuadas para cada tipo de cruce, son poco utilizadas por los involucrados en el proceso. Además, las normativas brasileñas que deberían guiar a los concesionarios ferroviarios, son difíciles de entender y tienen una aplicación práctica limitada (Peron, 2016).

Tabla 1. Normativa internacional y clasificación de los PAN

País	Clasificación de los PAN
Estados Unidos	<p>En EE. UU., los criterios de comportamiento humano y el historial de accidentes no se utilizan como base para los análisis de clasificación de los PAN, sino únicamente criterios físicos (distancia de visibilidad, número de vías, pendiente/curvatura de la carretera, calles adyacentes, reflejo del sol); de tráfico (volumen de vehículos automotores, trenes y peatones) y operativos (modo de utilización). Según Queensland Transport (1999), estos criterios se relacionaron mediante una ecuación matemática, con el fin de calcular el índice de "peligrosidad" (posibles accidentes), mediante el cual el Departamento de Transporte de EE. UU. considera posible predecir el número de sucesos que pueden producirse en un PAN determinado. A partir de las predicciones resultantes, Saccomanno y otros (2006) propusieron una clasificación en tres categorías de los PAN en EE. UU.: 1) PAN con señalización pasiva, 2) PAN con señalización activa y luces intermitentes; y 3) señalización activa con portones/barreras. Sin embargo, Raub (2006) considera que la ecuación propuesta por Queensland Transport (1999) no capta el patrón cambiante del tráfico automotor y ferroviario a lo largo del día, además de no tener en cuenta el ángulo del cruce con la carretera y la vegetación en las proximidades del paso. Asimismo, según Raub (2006), la existencia de solo tres categorías de sistemas de alerta no permite, por ejemplo, distinguir entre vallado parcial o completo con el uso de barreras/portones. Por lo tanto, aunque los criterios se relacionan mediante una ecuación matemática, resulta necesario reevaluar la clasificación utilizada en los EE. UU. con vistas a eliminar los puntos considerados defectuosos.</p>
Australia	<p>En Australia, se desarrollaron varios estudios sobre modelos de priorización de PAN, el principal es el Australian Level Crossing Assessment Model (ALCAM). Se trata de un algoritmo de clasificación que tiene en cuenta, para cada PAN, las propiedades físicas (características y controles) y los comportamientos humanos habituales relacionados con el tema (ALCAM, 2020). El ALCAM es una herramienta matemática que contempla las características físicas y los controles existentes tanto en los pasos a nivel ferroviarios como ferropedonales. El modelo considera que los elementos físicos y el comportamiento de los conductores y peatones ordinarios en el lugar deben correlacionarse para proporcionar una puntuación de "factor de probabilidad" para cada PAN, lo que permitiría comparar y priorizar el riesgo relativo en todos los PAN de una misma región. Además, el modelo asigna puntos de riesgo en función de las características del PAN estudiado y de la relación entre estas características y las diferentes causas de accidentes (ALCAM, 2020).</p>
Canadá	<p>En Canadá, se desarrolló un modelo de predicción de accidentes basado en datos de los 10.449 PAN del país, recogidos entre 1993 y 2001 (Saccomanno et al., 2006). Este modelo utiliza datos de colisiones, incluyendo inventario e historial de colisiones. Así, a partir de sus resultados, se identificaron los siguientes criterios para tener en cuenta en el análisis de los PAN: la existencia de dispositivos de alerta, los atributos geométricos, las características del tráfico y la ocurrencia de colisiones. Según Saccomanno et al. (2006), muchos modelos actuales de predicción de accidentes son incapaces de representar toda la gama de factores que explican la variación de la frecuencia de colisiones en cruces individuales durante un periodo de tiempo determinado. Sin embargo, para aumentar la fiabilidad de los modelos de predicción, el criterio de visibilidad se valida con el del modelo propuesto. El modelo resultante puede utilizarse después para evaluar la seguridad y las propuestas de tratamiento de los problemas vinculados a los cruces.</p>

Fuente: elaboración propia

La Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) estableció normativas relacionadas con el proceso de regulación de los PAN, tales como:

- NBR 7613:2019, que establece los requisitos para la determinación del momento de circulación (MC), el grado de importancia (GI) y el índice de criticidad (IC) para los cruces de carreteras sobre vías férreas al mismo nivel (ABNT, 2019a).
- NBR 12180:2009, que especifica los requisitos para equipos de protección eléctrica, para cruces de rutas sobre vías férreas en PAN públicos (ABNT, 2009).
- NBR 15680:2017, que especifica los requisitos de proyecto para nuevos cruces de carreteras sobre PAN públicos (ABNT, 2017).
- NBR 15942:2019, que establece la clasificación y los requisitos de los equipos de protección para cruces de carreteras por vías férreas (ABNT, 2019b).

Sin embargo, estas normas de la ABNT se basan en conceptos que, en la opinión de las concesionarias, no son muy aplicables en la práctica. Por ejemplo, la norma NBR 15680:2017, que se considera la norma orientadora sobre el tema, contiene ítems que no son aplicables a los PAN existentes. La norma NBR 7613:2019 sufrió una gran alteración cuando Carmo et al. (2007) propusieron incluir el índice de criticidad en su texto. No obstante, el desajuste entre esta norma y la realidad es que no se relaciona con las distintas categorías de PAN, que podrían tratarse de forma diferente, teniendo en cuenta no solo criterios de seguridad, sino también sociales y económicos.

El Manual de Cruces de Carretera-Ferrocarril (1979) del Departamento Nacional de Tránsito (DENATRAN, 1987) sigue siendo la base para cualquier estudio sobre PAN. Sin embargo, en estos 45 años cambiaron muchos criterios, sobre todo el número de vehículos, el volumen de transporte y la densidad poblacional.

Por lo tanto, resulta fundamental analizar qué criterios deben adoptarse actualmente para la clasificación y evaluar el impacto real de cada uno de ellos en el modelo propuesto de clasificación de pasos a nivel (PAN). Los aspectos de seguridad deben ser ponderados basándose en datos históricos, mientras que los volúmenes de tráfico deben evaluarse en diferentes períodos. Además, los costos y las inversiones deben ser considerados en el análisis.

Creemos que es esencial proponer un nuevo modelo brasileño para el análisis y tratamiento de los PAN, que debe ser normatizado en un único documento.

Consolidación de los criterios adoptados

A partir de las normas brasileñas existentes y de los modelos implementados en Estados Unidos, Canadá y Australia, se construyó la Tabla 2, que resume los principales criterios adoptados en dichos países para clasificar los pasos a nivel y definir posteriormente las medidas necesarias para garantizar la seguridad en estos lugares. Este tipo de análisis es crucial para mapear los criterios utilizados en diversas regiones del mundo, permitiendo evaluar cuáles de estos ítems son pertinentes para la realidad brasileña.

La Tabla 2 muestra que la mayoría de los criterios identificados se adoptan en al menos dos de los países estudiados. Sin embargo, es importante destacar que el modelo australiano es más complejo de analizar debido a su enfoque en el historial de accidentes, sus causas y consecuencias. Una debilidad notable de este modelo radica en el uso del criterio "comportamiento humano", que es altamente subjetivo y difícil de cuantificar. La subjetividad surge de las percepciones personales y la variabilidad en las opiniones humanas, que pueden cambiar según la urgencia o criticidad de cada situación, sin un estándar definido para su análisis y determinación, lo que complica aún más su evaluación.

Con respecto al modelo estadounidense, su mayor ventaja radica en que mapea todas las situaciones de tráfico, incluyendo a los peatones, al igual que el modelo actualmente adoptado en Brasil. Sin embargo, su principal debilidad es la exclusión de criterios relacionados con los accidentes, lo que limita su capacidad para reflejar una base sólida en la clasificación de cruces.

Entre los modelos estudiados, el canadiense muestra un menor número de criterios físicos mapeados. Esto podría representar un riesgo elevado, dado que las condiciones locales tienen un impacto directo en los análisis requeridos.

En la Tabla 2 se observó que todos los criterios relacionados con las condiciones de tráfico ya han sido adoptados por las normativas brasileñas para definir las medidas de seguridad necesarias en los PAN.

En cuanto a los criterios físicos, Brasil ya considera aspectos como la distancia de visibilidad, la pendiente de la carretera y el número de carriles. El criterio "ángulo de la carretera", adoptado únicamente por Canadá, actualmente se considera un obstáculo en el cálculo de la visibilidad, que tiene en cuenta la ubicación y el acceso al PAN.

Asimismo, se argumenta que el criterio "reflejo del sol" no debería considerarse de manera aislada en el análisis, ya que la iluminación se incluye en los factores base del modelo de cálculo. Además, el criterio de "calles adyacentes", que ya está normalizado y controlado por los responsables del tráfico automotor, no debería añadirse como un nuevo punto, dado que su impacto en el modelo de análisis de riesgos en los PAN ya se refleja en el volumen de tráfico.

Tabla 2. Resumen de los criterios utilizados en cada país

Parámetros adoptados	Países				
Clasificación	Descripción	Australia	Brasil	Canadá	EE. UU.
Físicas	Ángulo de la carretera			x	
	Reflejo del sol				x
	Calles adyacentes				x
	Distancias de visibilidad (curvatura)	x	x	x	x
	Pendiente de la carretera (rampa)		x		x
	Número de vías		x		x
Tráfico	Velocidad de los trenes	x	x	x	
	Velocidad de los vehículos	x	x	x	
	Volumen de peatones		x	x	x
	Volumen de trenes	x	x	x	x
	Volumen de vehículos	x	x	x	x
Operacionalización	Existencia de dispositivos de alerta			x	
	Modo de utilización				x
Accidentes	Causas	x		x	
	Consecuencias	x			
	Ocurrencias	x		x	
Comportamiento humano		x			

Fuente: elaboración propia

Método de análisis de los riesgos de accidente en los pasos a nivel

El método propuesto se divide en dos módulos, aunque no es obligatorio ejecutarlos de forma conjunta. El primer módulo, "Análisis técnico de pasos a nivel", consiste en el relevamiento de las características físicas y operativas, así como en el análisis de los PAN en relación con las normas brasileñas vigentes. Se presta especial atención a la definición de las etapas para la categorización de los PAN.

El segundo módulo, "Priorización de la demanda de adecuación de pasos a nivel", establece un método para actuar en los PAN según su grado de riesgo. Aquí se contrasta el tipo de protección existente con el exigido por la norma. La diferencia resultante genera una lista de prioridades para las intervenciones y adecuaciones necesarias. En caso de igualdad de valores entre los PAN del grupo analizado, se utiliza el historial de accidentes para priorizarlos. A continuación, se detallan ambos módulos.

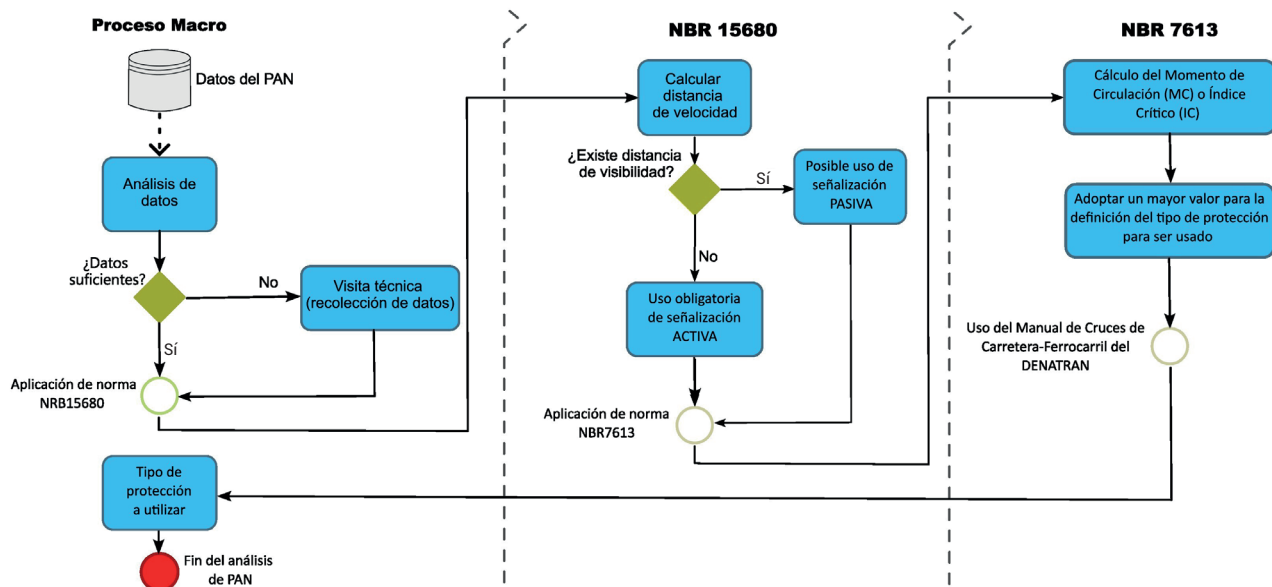
El módulo I, además de relacionar las normas vigentes en Brasil, incluye la etapa de análisis de la visibilidad como parte fundamental y decisoria del proceso, de modo que no se limita al diseño de nuevos PAN. El módulo II presenta una forma de priorizar la demanda en los casos en que se analice más de un PAN, ayudando a definir dónde se deberían realizar las primeras inversiones y adecuaciones.

Para facilitar la aplicación práctica del método, se desarrolló una herramienta informática con base en un software Excel, que puede ser utilizada en cada una de las etapas propuestas para el análisis de los PAN.

Módulo I – Análisis técnico de pasos a nivel

El análisis técnico de PAN tiene por objetivo clasificarlos en grupos en función de sus parámetros operativos y físicos y de la aplicación de las normas brasileñas existentes, con el fin de definir el tipo de protección a utilizar en cada caso. La Figura 1 sintetiza las etapas a desarrollar en este tipo de análisis, que correlaciona las normas vigentes e incluye la fase de análisis de la visibilidad como factor decisivo.

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología propuesta



Fuente: elaboración propia

La Figura 1 muestra que la primera etapa de este módulo consiste en la identificación del PAN a analizar, que debe ir seguida de la cartografía de sus características físicas (Tabla 3). También se deben analizar las características operacionales del modo ferroviario y automotor en dicho PAN (Tabla 3), que están directamente relacionadas con los ítems "seguridad y protección" necesarios para un cruce ferroviario.

La Figura 1 ilustra que la primera etapa de este módulo implica la identificación del PAN a analizar, seguida por el mapeo de sus características físicas, como se detalla en la Tabla 3. Además, se analizan las características operacionales del modo ferroviario y del automotor en el PAN bajo estudio, las cuales están directamente vinculadas a los requisitos de seguridad y protección necesarios para los cruces ferroviarios.

Cabe aclarar que los parámetros considerados en esta fase pueden variar constantemente, por lo que el análisis debe reflejar siempre los que generan mayor riesgo. Por ejemplo, la VMA, que es la velocidad máxima autorizada en km/h para un vehículo ferroviario, puede variar en función del sentido de circulación de los trenes y de las restricciones técnicas de vía impuestas por diferentes escenarios.

Tabla 3. Formulario de relevamiento de datos de PAN

Formulario de relevamiento de datos		
Datos de registro	Identificación del PAN	
	Nombre del PAN	
	Municipio	
	Estado	
	km	
Características físicas del PAN	Longitud del PAN	12,00
	Ángulo de cruce	90,00
	Característica de acceso al PAN	A nivel
	Rampa máxima de aproximación de la vía pública (%)	0,00
		Inferior al 3 %
	Longitud de la rampa	0,00
	Factor de corrección del tiempo adoptado	1,40
	Contiene electrificación	Sí
	Visibilidad del margen derecho de la vía (sentido ascendente)	300
	Visibilidad del margen derecho de la vía (sentido descendente)	300
	Visibilidad del margen izquierdo de la vía (sentido ascendente)	300
	Visibilidad del margen izquierdo de la vía (sentido descendente)	300
	Visibilidad	Inferior a 150 m
	Análisis de las condiciones de visibilidad en función de la velocidad del tren	Restricción o causa: visibilidad
		Uso obligatorio de señalización activa
Tipo de protección existente	Activa tipo 5	

Formulario de relevamiento de datos		
Características operacionales del modo ferroviario en el PAN	VMA ferroviaria - sentido ascendente	40 km/h
	VMA ferroviaria - sentido descendente	40 km/h
	VMA del tren más rápido (VMA ferroviaria)	Entre 40 y 80 km/h
	Número de líneas	1
		Vía única
	TD - Cantidad de trenes durante el día	15,35
TD - Cantidad de trenes durante la noche	15,35	
Características operacionales del modo automotor en el PAN	VMA en la vía pública (VMA en carretera)	Inferior a 50 km/h
	Número de carriles	3
		3 o más carriles
	Condiciones del pavimento	Regular
	Condiciones de iluminación	Eficiente
	Volumen de vehículos de paseo (vehículo + motocicletas)	Superior al 20 %
	Volumen de camiones	Hasta 5 %
	Volumen de ómnibus	Hasta 5 %
	Volumen de peatones	Superior al 20 %
	VD - Volumen de vehículos durante el día	16627,00
	VD - Volumen de vehículos durante la noche	5653,18
Longitud del vehículo (m)	22,00	
Historial de accidentes	N.º de accidentes con víctimas fatales	2
	N.º de accidentes con heridos	3
	N.º de accidentes con daños materiales	0
	Factor ponderado de accidentes (FPA)	29,50
	Nivel de seguridad (INS)	97,29

Fuente: elaboración propia

A partir de los datos recogidos, se realizaron los cálculos necesarios para determinar el impacto generado por la visibilidad en el área del cruce, con el tipo de protección que se debe aplicar. De acuerdo con la NBR 15680 (ABNT, 2017), el cálculo de la distancia de visibilidad es determinante para la necesidad o no de señalización pasiva. Si los valores existentes son inferiores a la distancia mínima de visibilidad, se torna obligatorio el uso de señalización activa, sea manual o automática.

Luego, se estimó el momento de circulación (MC) y el índice de criticidad (IC), de acuerdo con los criterios de la NBR 7613 (ABNT, 2019a). Tanto el MC como el IC representan numéricamente la intensidad de uso de un PAN. Sin

embargo, el MC solo correlaciona trenes y vehículos, mientras que el IC también tiene en cuenta los parámetros físicos existentes. Dando prioridad a la seguridad implicada en el cruce de un PAN, se sugiere comparar los valores del MC y del IC, y utilizar el valor más alto para definir el tipo de protección que debe aplicarse. Esto se debe a que cuanto mayor sea el valor IC/MC, mayor será el nivel de seguridad de la protección a ser aplicada.

Por último, se definió el tipo de protección a implementar en el PAN, siguiendo el Manual de Cruces de Carretera-Ferrocarril, que define las normas de protección y control existentes y aprobadas en Brasil. Así, conociendo el tipo de carretera y su categoría, relevada en la etapa 4 de este primer módulo, y con el valor resultante de la comparación del MC e IC, es posible definir el tipo de protección a aplicar y, consecuentemente, el tipo de control a utilizar (DENATRAN, 1987).

Módulo II – Priorización de la demanda de adecuación de los PAN

El objetivo de este módulo es desarrollar un proceso que permita priorizar las inversiones en los PAN, con el fin de ayudar al proceso de toma de decisiones. Esta priorización es fundamental, ya que los recursos para este tipo de obras son limitados.

Para priorizar las inversiones en los PAN, el criterio utilizado fue la mayor divergencia entre la protección existente y el tipo de protección definido por la norma. Para cuantificar esta divergencia, se asignó una ponderación específica a cada tipo de protección, considerando que cuanto más sencillo es el tipo de protección, menor es el peso que se le atribuye.

Para ello, se estimó que la señalización pasiva se compone únicamente de elementos estáticos (carteles, señalización horizontal, entre otros), mientras que la señalización activa se caracteriza por ser el resultado de una acción, que puede ser manual (implementadas por señaleros/guardas) o automática (barreras, sistema de detección de trenes, etc.). Las ponderaciones para cada tipo de protección son: 1. Sin señalización; 2. Pasiva; 3. Activa; 4. Activa tipo 4; 5. Activa tipo 5.

Para cada PAN analizado, se verificó el peso del tipo de señalización exigido por la norma (NBR7613), restando de este valor el peso atribuido al tipo de señalización existente. Cuanto mayor sea el valor de esta diferencia, mayor será la prioridad atribuida a dicho PAN para su adecuación.

El módulo II se utilizó para definir las prioridades de adecuación de un PAN determinado en relación con el grupo analizado. Por lo tanto, para hacer el análisis aún más visual, fueron mapeados los posibles resultados (que son valores enteros que van de -4 a 4), con colores de gradación (de verde a rojo) para cada uno de ellos.

En la matriz que relaciona el tipo de protección existente con el tipo de protección exigido por norma, se propone un importante artificio visual que se utilizará para ayudar al proceso de toma de decisiones relacionado con la determinación de la prioridad de adaptación de los PAN. Así, mediante el análisis de la Tabla 4, se puede definir la prioridad que debe darse al PAN objeto de análisis.

Tabla 4. Matriz que relaciona el tipo de protección existente con el tipo de protección exigido por la norma

		Protección existente				
		Tipos				
		Activa tipo 5	Activa tipo 4	Activa	Pasiva	Sin señalización
Protección exigida por la norma	Activa tipo 5					
	Activa tipo 4					
	Activa					
	Pasiva					
	Sin señalización					

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4 se observa que se le dio la máxima prioridad (rojo más oscuro) a los casos en los que no hay señalización de ningún tipo y que, según la norma, deberían tener señalización "Activa tipo 5", y así sucesivamente. Para los casos en que el tipo exigido por la norma es inferior al existente, se sugiere que no se realicen cambios, ya que superan lo requerido.

Sin embargo, en función del número de PAN que haya que evaluar, puede resultar difícil establecer prioridades basándose únicamente en el resultado de esta diferencia, ya que los valores resultantes de la resta sugerida varían ligeramente, por lo que varios PAN de un mismo grupo pueden tener la misma prioridad.

En estos casos, además del proceso de priorización establecido por la divergencia entre el tipo de protección existente y la normalizada, también deberá evaluarse el historial de accidentes de cada PAN, contemplando el número de accidentes con víctimas fatales, accidentes con heridos y accidentes con daños materiales.

Para ello, se deben cruzar los datos de las empresas concesionarias y del organismo fiscalizador. A partir de esta información, se puede calcular el valor del Factor Ponderado de Accidentes (FPA), definido por Carmo et al. (2007), teniendo en cuenta el número de accidentes generados en un PAN en los últimos cinco años que hayan tenido víctimas fatales, heridos y accidentes con solo daños materiales.

Luego, se debe formular otra lista de prioridades para desempatar entre los PAN que obtengan la misma puntuación por la diferencia entre el tipo de protección existente y la exigida por la norma. De este modo, el PAN prioritario será el que tenga el FPA más alto.

El método propuesto fue evaluado por expertos en la materia. Tras su validación, fue aplicado de 2014 a 2020 a una muestra de más de 500 PAN existentes a lo largo de la traza ferroviaria de una empresa concesionaria de Brasil. Esta línea cruza importantes centros urbanos, por los que transitan volúmenes significativos de mercancías brasileñas destinadas a los mercados de exportación y al interior del país.

A lo largo de esta red, existen interferencias entre distintos modos de transporte (además del ferrocarril), aunque más de la mitad se producen entre el modo automotor y el modo ferroviario.

No obstante, para saber si una determinada intervención realmente aumenta la seguridad, y en qué medida; hay que probarla y verificar sus resultados (Pilkington, 2005). Dado que no es fácil llevar a cabo experimentos de esta naturaleza, primero se aplica la intervención y luego se observan y estudian los resultados obtenidos. En este estudio se utilizó una metodología de antes y después para evaluar la eficacia de las medidas aplicadas (Hauer, 1997).

Aplicación del método y análisis de los resultados de las acciones preventivas

Inicialmente, para cada PAN de la red ferroviaria bajo análisis se estudiaron las características de identificación (nombre del PAN y municipio donde se ubica), las características operacionales del modo ferroviario (número de líneas, volumen de trenes, etc.) y las características operacionales del modo automotor (número de carriles, volumen de camiones, de ómnibus, etc.), así como el tipo de protección actualmente existente en dicho PAN. A continuación, se aplicó el método de análisis propuesto, comparando el tipo de protección existente con el definido por la norma, y se analizaron los datos históricos de accidentes con el fin de jerarquizar las inversiones y los lugares a priorizar.

La Tabla 5 muestra un ejemplo de cómo se aplicó el método a 10 de los 500 PAN que se analizaron y cómo se priorizaron las inversiones. Estos 10 PAN forman parte de la red ferroviaria de una concesionaria y están situados en centros urbanos con una alta densidad poblacional.

Tabla 5. Priorización de 10 PAN a recibir inversiones

PAN identificado	Estatus del PAN	Protección existente		Protección exigida por la norma		Diferencia
		Descripción	Ponderación	Descripción	Ponderación	
Muestra PAN - A	Irregular	Sin señalización	1,0	Activa	3,0	2,0
Muestra PAN - B	Irregular	Sin señalización	1,0	Activa tipo 4	4,0	3,0
Muestra PAN - C	Irregular	Pasiva	2,0	Activa	3,0	1,0
Muestra PAN - D	Irregular	Pasiva	2,0	Activa	3,0	1,0
Muestra PAN - E	Irregular	Pasiva	2,0	Activa tipo 4	4,0	2,0
Muestra PAN - F	Regular	Activa tipo 4	4,0	Activa	3,0	-1,0
Muestra PAN - G	Regular	Activa tipo 4	4,0	Activa tipo 4	4,0	0,0
Muestra PAN - H	Regular	Activa tipo 5	5,0	Activa	4,0	-2,0
Muestra PAN - I	Regular	Activa tipo 5	5,0	Activa tipo 4	4,0	-1,0
Muestra PAN - J	Regular	Activa tipo 5	5,0	Activa tipo 5	5,0	0,0

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 6 se expone un ejemplo de la aplicación de la matriz de colores (resultante de la diferencia entre lo exigido en la norma y lo existente), que determina la prioridad de adaptación de los PAN de la muestra. Se observa que inicialmente se priorizó el PAN identificado como "Muestra PAN - B", por ser el que presenta mayor discrepancia entre lo existente y lo normado.

Posteriormente, se les asignó prioridad a los PAN identificados como "Muestra PAN - A", seguidos de los "Muestra PAN - E", que no presentan señalización alguna. Por último, en función del número de accidentes, se priorizaron las muestras denominadas "Muestra PAN - D" y "Muestra PAN - C".

Tabla 6. Especificación de la protección exigida por la norma brasileña vs. protección existente

Protección existente						
Protección exigida por la norma	Tipos	Activa tipo 5	Activa tipo 4	Activa	Pasiva	Sin señalización
	Activa tipo 5	Muestra PAN - J				
	Activa tipo 4	Muestra PAN - I	Muestra PAN - G		Muestra PAN - E	Muestra PAN - A
	Activa	Muestra PAN - H	Muestra PAN - F		Muestra PAN - D Muestra PAN - C	Muestra PAN - B
	Pasiva					
	Sin señalización					

Fuente: elaboración propia

Esta priorización representó una inversión de más de 5 millones de reales en las cinco señales activas instaladas. La Tabla 7 muestra la reducción del número de accidentes entre 2016 y 2019 para estos PAN. Los puntos resaltados en gris muestran los años de instalación.

Tabla 7. Reducción del número de accidentes mediante la inversión en los PAN priorizados por la metodología

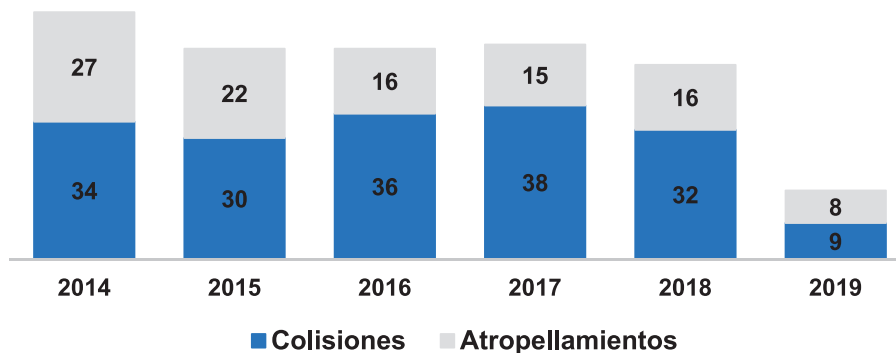
Ítem	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Muestra PAN - B	5	3	3	2	1	0
Muestra PAN - A	2	1	1	1	1	0
Muestra PAN - E	1	2	0	3	2	0
Muestra PAN - D	2	1	1	2	2	1
Muestra PAN - E	1	3	2	5	3	0

Fuente: elaboración propia

A lo largo de los años de aplicación del método expuesto, fue posible observar una reducción del número de sucesos como colisiones con vehículos y atropellamiento de peatones en los cruces ferroviarios priorizados, como se muestra en la Figura 2, que abarca el periodo comprendido entre 2014 y 2019.

Como puede verse, se produjo un descenso del 72 % en el número de ocurrencias entre 2014, cuando se aplicó por primera vez el método de análisis, y el año 2019. Este resultado refuerza la importancia y la eficacia de las inversiones realizadas en los PAN priorizados. También se observa que el número de colisiones se redujo un 74 % de 2014 a 2019, así como el número de atropellamientos de peatones, que disminuyó un 70 %.

Figura 2. Cantidad de colisiones con vehículo y atropellamientos de peatones en PAN entre 2014 y 2019



Fuente: elaboración propia

La baja de sucesos expuesta en la Figura 2 se debe a las inversiones realizadas por las concesionarias en los últimos años en materia de seguridad operacional (como la instalación de sistemas de protección activa para los cruces), basadas en el método propuesto, que compara el tipo de señalización existente y el tipo de señalización necesaria, además de las negociaciones legales y gubernamentales. Las campañas de concientización de la población sobre los peligros de cruzar imprudentemente un paso de peatones o cruzar indebidamente un PAN también desempeñan un papel esencial, ya que muchos accidentes están relacionados con la imprudencia de peatones y conductores.

Al aplicar la metodología a los ocho municipios con mayor siniestralidad en la red analizada, se observa una reducción en el número de accidentes. Como se destaca en la Tabla 8, el municipio 1 mostró los resultados más significativos en términos de reducción de accidentes (de 13 en 2014 a 0 en 2019). Esta ciudad cuenta con interferencia ferroviaria en toda su extensión territorial, alta densidad poblacional y gran representación económica en el contexto de su Estado.

En dicho municipio, las inversiones se priorizaron utilizando la metodología propuesta en dos PAN (Muestra PAN - B y Muestra PAN - E), que eran responsables del mayor volumen de accidentes en la ciudad. Como resultado, el número de accidentes se redujo, tras el mantenimiento y las obras, a cero en 2019.

Tabla 8. Municipios con la mayor cantidad de colisiones y atropellamientos en PAN entre 2014 y 2019

	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Municipio 1	13	8	7	7	8	0
Municipio 2	7	4	9	8	1	0
Municipio 3	5	1	2	4	5	1
Municipio 4	4	2	2	7	3	1
Municipio 5	4	6	4	3	5	1
Municipio 6	3	0	5	1	5	2
Municipio 7	3	2	5	2	2	1
Municipio 8	3	3	4	1	2	1

Fuente: elaboración propia

Cabe señalar que el método de priorización de las intervenciones, además de reducir el número de accidentes, también aportó otros beneficios indirectos al municipio 1. Las intervenciones, a su vez, permitieron eliminar o reducir las restricciones de velocidad. De esta forma, fue posible aumentar la VMA del tramo, generando un menor impacto en el tráfico de la ciudad (ya que el PAN se despeja más rápidamente), garantizando ganancias para la operación y para la población que necesita circular por los PAN. El aumento de la VMA fue gradual, cada 5 km/h, junto con un trabajo de concienciación para que la comunidad pudiera adaptarse a la hora de llegada del tren al PAN y así evitar cruzar la carretera de forma imprudente.

Además, el aumento de la VMA en el tramo estudiado permitió a los trenes alcanzar mayores velocidades y, por lo tanto, circular más rápido, reduciendo el tiempo del ciclo. A la velocidad anterior de 30 km/h, el tren necesitaba un promedio de 3 minutos para cruzar el PAN. Ahora, a una velocidad de 50 km/h, el tren necesita un promedio de 1 minuto y 55 segundos. Esta reducción también se refleja en una mayor satisfacción de los clientes, ya que garantiza entregas más rápidas de la carga.

La reducción del ciclo garantiza una disminución del número de activos en circulación (al menos dos locomotoras modelo AC44 y 136 vagones), lo que genera los siguientes beneficios: menor impacto en el tráfico en áreas urbanas (menor cantidad y tiempo de impacto), disminución de ruidos emitidos por el tráfico ferroviario, menor frecuencia de mantenimiento de la vía principal y del material rodante y menor consumo de combustible.

El ciclo completo del tren (circulación de un tren vacío más un tren cargado), que recorre aproximadamente 1500 km, consume una media de 25.000 litros de diésel. Así, el aumento de la VMA, permitido por el uso de una señalización adecuada, puede garantizar la reducción del ciclo del tren y, por lo tanto, contribuir a la reducción en el consumo de combustible.

Cabe señalar que el método utilizado en este trabajo fue presentado en un foro técnico al que asistieron representantes y especialistas de las concesionarias brasileñas, incluidos los tres especialistas que realizaron el estudio. Hubo un consenso común entre los representantes de que el uso del método propuesto mejoraría el proceso de priorización de las intervenciones en los PAN en comparación con el proceso empírico que utilizan.

Se destacó la importancia de registrar este método basándose en normas nacionales e internacionales, lo que facilita su reproducción en otras trazas ferroviarias, independientemente de su ubicación. Además, se subrayó la importancia de que la metodología complemente las normas de Brasil, ya que algunas de estas no están estandarizadas ni reguladas.

Conclusiones

La normativa brasileña sobre señalización en pasos a nivel es antigua y está dividida en diferentes normas. En consecuencia, resulta necesario actualizar la legislación, incluir la información pendiente (debido a los cambios estructurales del transporte a lo largo del tiempo) y directrices/sugerencias para verificar la señalización existente.

El objetivo de este trabajo consiste en consolidar las normativas brasileñas sobre el tema de la señalización en los PAN e incluir etapas basadas en documentos internacionales, que puedan contribuir a una mayor fiabilidad en la elección de la señalización adecuada para cada PAN. En la propuesta de metodología se incluyeron etapas que van desde el relevamiento y análisis de datos, el cálculo de indicadores y la asignación de ponderaciones para la elección del tipo de señalización y la priorización de las inversiones.

Los resultados del método desarrollado en este trabajo mostraron que los criterios internacionales (de Estados Unidos, Australia y Canadá), vinculados a las normas reglamentarias brasileñas, se complementaban entre sí y reforzaban la importancia de la asertividad a la hora de priorizar el mantenimiento en los PAN críticos, considerados de alto riesgo. Más del 60 % de los accidentes ferroviarios en Brasil ocurren entre vías férreas y carreteras en PAN, y la principal causa es la imprudencia de conductores y peatones (ANTT, 2015).

La aplicación del método propuesto, junto con la ejecución de campañas de concientización en la red ferroviaria analizada, permitió reducir en un 72 % los accidentes en general, en un 74 % las colisiones con vehículos y en un 70 % los atropellamientos con peatones. También se obtuvieron otros beneficios, como un aumento de la VMA en determinados tramos, lo que se tradujo en una reducción del número de trenes en circulación, así como un menor impacto en el tráfico en las zonas urbanas y una reducción de los riesgos y accidentes. La reducción del número de trenes en circulación también contribuye a reducir el consumo de combustible, lo que equivale a una disminución de las emisiones contaminantes.

El uso de una señalización adecuada tiene un impacto positivo en la sociedad al reducir los riesgos para los coches y los peatones, como el número de accidentes, el ruido y el impacto en el tráfico. También tiene un impacto económico, por ejemplo, una reducción de las compensaciones a la sociedad, menos mantenimiento de los activos (material rodante) y, en consecuencia, menos combustible. Por último, las mejoras medioambientales están relacionadas con la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos de las locomotoras.

Cabe señalar que el presupuesto anual de una empresa ferroviaria es un factor limitante para la inversión en pasos a nivel. Por lo tanto, el método propuesto contribuye a una decisión más asertiva en cuanto al uso de los recursos disponibles. Así, se deberían reevaluar anualmente los lugares más críticos y priorizar las inversiones para los años (o periodos) siguientes. Además, las decisiones presupuestarias pueden influir directamente en la solución, ya que la gestión puede optar por destinar sus inversiones a otras necesidades.

Los efectos beneficiosos para la empresa y la sociedad quedan asegurados mediante la aplicación de la metodología propuesta, con base en los datos de la reducción de accidentes tras la realización de obras en zonas clasificadas como críticas y sin señalización adecuada.

No obstante, cabe señalar que este estudio utilizó la metodología del antes y el después para analizar la eficacia de las medidas empleadas, por lo que no es posible afirmar con exactitud que los resultados obtenidos no se deban también a otros factores, como tendencias generales de reducción de accidentes o incluso a otras contingencias.

Con el fin de profundizar este trabajo, se proponen nuevos estudios para automatizar la verificación de los tipos de señalización, si se ajustan a la norma, y la priorización de las inversiones. Se sugiere que futuros análisis adopten para superar estas limitaciones grupos de control de comparación y regresión (Elvik et al., 2015), así como la aplicación y validación del método por expertos de otras empresas ferroviarias de cargas, pasajeros y metro del país y del mundo.

La aplicación global del estudio deberá considerar la modificación de los parámetros a los practicados en la región y en el país, ya que el modelo propuesto se basa en normas brasileñas vigentes que tienen sus propias particularidades. Como la metodología se generó a partir de criterios ya adoptados internacionalmente, se facilita su expansión.

Bibliografía

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019a). NBR 7613:2019: Via férrea - Travessia rodoviária - Determinação do grau de importância e momento de circulação. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=412488>

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2009). NBR 12180:2009: Via férrea - Travessia rodoviária - Passagem em nível pública - Equipamento de proteção elétrico. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=38399>

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 15680:2017: Via férrea – Travessia rodoviária – Requisitos de projeto para passagem em nível pública. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=382578>

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019b). NBR 15942:2019: Via férrea - Travessia rodoviária - Passagem de nível pública - Classificação e requisitos para equipamento de proteção. <https://www.abntcatalogo.com.br/>

Areosa, J. (2012). O contributo das ciências sociais para a análise de acidentes maiores: dois modelos em confronto. *Anál. Social*, 204, 558-584. http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0003-25732012000300003&lng=pt&nrm=iso

ALCAM (2020). Australian Level Crossing Assessment Model – Australian Norm. <http://alcam.com.au/>

ANTT (2015). ANTT prepara resoluções para ampliar a fiscalização de ferrovia. <http://canaldoservidor.infraestrutura.gov.br/ultimas-noticias/3099-antt-prepara-resolu%C3%A7%C3%B5es-para-ampliar-a-fiscaliza%C3%A7%C3%A3o-de-ferrovia.html>

ANTT (2020). Agência Nacional de Transporte Terrestre. <http://www.antt.gov.br>

Carmo, R. C., Campos V.B.G., Guimarães J.E. (2007). Procedimento para Avaliação da Segurança de Passagens de Nível, Anais do XXI ANPET- Congresso de Ensino

e Pesquisa. Rio de Janeiro, RJ. Carmo, R. C.; Lopes, L. A. S. e Campos, V. B. G. (2012). Análise de práticas para implantação do gerenciamento de atrito em uma ferrovia. Em XXVI ANPET. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2012. Joinville: DECTI. v. 1.

Castillo, R. (2007). Agronegócio e Logística em áreas de cerrado: expressão da agricultura científica globalizada. *Revista da ANPEGE*, 3, 33-43.

DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito (1987). Manual de Cruzamentos Rodoferroviários. Coleção Serviços de Engenharia. Brasília, DF.

Elvik, R.; Høy, A.; Vaa, T.; Sørensen, M. (2015). O Manual de Medidas de Segurança Viária. Madrid: Fundación Mampfre.

Ferreira, M. B. M. e Almeida, R. L. (2006). Módulo 10 Estudos de Caso: Avaliação de Riscos de Ferrovias. Apostila fornecida aos participantes dos cursos de Estudo de Análise de Riscos e Programa de Gerenciamento de Riscos para técnicos do Ministério do Meio Ambiente, IBAMA e OEMAs. Rio de Janeiro, RJ.

Furtado, A. R. (2012). Metodologia seis sigma como estratégia de melhoria de processo e redução de acidentes ferroviários. Monografia (graduação). Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF. Juiz de Fora, MG.

Hauer, E. (1997). Observational Before-After Studies In Road Safety, Estimating the effect of highway and traffic engineering measures on road safety. Department of Civil Engineering, University of Toronto.

Jusbrasil (2020). Artigo 90 da Lei n.º 9.503 de 23 de setembro de 1997. <https://www.jusbrasil.com.br/topicos/10616742/artigo-90-da-lei-n-9503-de-23-de-setembro-de-1997>

Peron, P. P. F. (2016). Passagem em Nível: Proposta de um modelo de Categorização e Sinalização. Dissertação (mestrado). Instituto Militar de Engenharia -IME. Rio de Janeiro, RJ.

Pilkington P. e Kinra, S. (2005). Effectiveness of speed cameras in preventing road traffic collisions and related casualties: systematic review. *BMJ*, 330(7487), 331-334. <https://doi.org/10.1136/bmj.38324.646574.AE>

Queensland Transport (1999). Level Crossing Risk Scoring Matrix. Manual produced by the Level Crossing Safety Steering Group. Australia.

Raub, R. A. (2006). Examination of Highway-Rail Grade Crossing Collisions Over 10 years in Seven Midwestern States. *ITE Journal*, 76(4), 16-26.

Ribeiro, G. V. (2011). Uma Contribuição metodológica ao atendimento emergencial em ferrovias. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

Saccomanno, F. F.; Park, P. Y.-J.; & Fu, L. (2006). Analysis of Countermeasure Effects for Grade Crossings. 9th International Level Crossing safety and Trespass Prevention Symposium, Montreal.

Silva, R. de O. (2010). Mapeamento de vulnerabilidade ambiental para o gerenciamento de riscos nos transportes ferroviários de produtos perigosos. Dissertação (mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). San Pablo, SP.

ARTICULO DE DIVULGACIÓN

La formación de hielo en aeronaves en tierra

Aircraft ground icing

Lic. Ernesto Agustín García
Ingeniero Industrial (UTN)

egarcia50@hotmail.com

Lic. Nicolás Rivaben
Lic. en Ciencias de la
Atmósfera (UBA)

nickmeteo@hotmail.com

Lic. Leonardo Fabián Gigante
Especialista en Higiene y
Seguridad en el Trabajo (UTN)

lgigante@yahoo.com

Ing. Carlos Mario Carbonel
Ingeniero Aeroespacial,
Aeronáutica y Astronáutica
(UTN)

ccx_carlos97@hotmail.com

Palabras clave: Englamiento,
Seguridad Operacional,
Transporte Aeronáutico,
Gestión de Riesgo,
Recomendaciones de
Seguridad.

Keywords: *Ground
Icing, Operational Safety
Aeronautical Transportation,
Risk Management, Safety
Recommendations.*

Recibido: 25/06/24
Aceptado: 07/07/24

Resumen

El artículo aborda el fenómeno del ground icing, la acumulación de hielo en aeronaves en tierra, que afecta la seguridad operacional. El ground icing se produce por bajas temperaturas y alta humedad, formando escarcha (hielo en cristales) y hielo claro (transparente y denso). Estos tipos de hielo alteran el perfil aerodinámico, incrementan el peso y la resistencia, y reducen la sustentación y el empuje. Factores como la temperatura ambiente, la cantidad y tipo de combustible, el tiempo de vuelo a altas altitudes, y la humedad relativa contribuyen a su formación. Es esencial implementar prácticas preventivas y comprender los riesgos para asegurar operaciones aéreas seguras.

Abstract

The article addresses the phenomenon of ground icing, the accumulation of ice on aircraft on the ground, which affects operational safety. Ground icing is caused by low temperatures and high humidity, forming frost (ice in crystals) and clear ice (transparent and dense). These types of icing alter the airfoil, increase weight and drag, and reduce lift and thrust. Factors such as ambient temperature, amount and type of fuel, flight time at high altitudes, and relative humidity contribute to their formation. It is essential to implement preventive practices and understand the risks to ensure safe air operations.

Introducción

En este artículo, exploraremos las implicancias del concepto de *ground icing* para el transporte aeronáutico, que remite a un fenómeno que puede afectar la seguridad operacional de las aeronaves en tierra. Ahondaremos en sus características, clasificaciones y efectos.

¿Qué es el *ground icing*?

El *ground icing* es la contaminación de hielo sobre cualquier superficie de la aeronave que se encuentra en tierra. Se produce por una combinación de baja temperatura ambiente y de los planos, y una humedad relativa elevada.

Dentro de los diferentes tipos de formación de *ground icing* se encuentran la escarcha o helada (*active frost*) y el hielo claro (*clear ice*) en cualquiera de sus tipos.

Figura 1. Tipos de *ground icing*



Escarcha o helada

active frost

Congelación del vapor de agua en pequeños cristales de hielo sobre la superficie de la aeronave con temperaturas inferiores a 0°C y elevada humedad relativa. Ocurre en ausencia de luz solar y tiene su máxima incidencia al amanecer.



Hielo claro

clear ice

Formación de hielo transparente de alta densidad que afecta principalmente a las superficies críticas de la aeronave. Es difícil de detectar y puede afectar gravemente la seguridad operacional, ya que muchos mecanismos *anti-icing* y *de-icing* son ineficientes para prevenirlo o removerlo.

Fuente: elaboración propia

Escarcha o helada (*active frost*)

La formación de escarcha consiste en la congelación del vapor de agua en pequeños cristales de hielo sobre la superficie de los planos de la aeronave con temperaturas inferiores a 0°C y elevada humedad relativa (por encima del 90 %). Por lo general, ocurre en ausencia de luz solar, ya sea a la sombra o bien en horas de la noche, y tiene su máxima incidencia al amanecer.

Hielo claro (*clear ice*)

El hielo claro consiste en la formación de hielo transparente de alta densidad que afecta principalmente a las superficies críticas de la aeronave.

Este tipo de hielo es el más difícil de detectar y puede afectar gravemente la seguridad operacional, dado que muchos mecanismos *anti-icing* y *de-icing* en ciertos tipos de aeronaves son ineficientes para prevenirlo o removerlo.

Este tipo de hielo puede presentarse en tres formas:

1. Lluvia o llovizna engelante: las gotitas de lluvia o llovizna caen en estado líquido con temperatura por debajo de 0°C —superenfriada— y cambian abruptamente al estado sólido (hielo) al colisionar con los planos o superficies críticas de la aeronave.
2. Niebla engelante: se produce cuando la aeronave está expuesta a condiciones de niebla, con alta humedad relativa y temperatura de 0°C. Análogamente al caso de la lluvia o llovizna engelante, las gotitas de nube —niebla— en estado líquido se transforman en hielo cuando interceptan los planos de la aeronave con temperaturas por debajo de 0°C.
3. Efecto humedad por enfriamiento (*cold soak effect*): puede existir en el caso de que una aeronave realice un turn-around, llegando a superficie con una temperatura alar inferior a 0°C; si hay precipitación líquida con temperaturas cercanas a 0°C, puede generarse englamamiento de manera análoga al caso de lluvia o llovizna engelante. Este efecto se produce cuando las alas de la aeronave contienen combustible con temperaturas por debajo de 0°C, debido al vuelo efectuado en niveles altos, o bien en casos en los que, al repostar, el combustible está a muy baja temperatura y la temperatura ambiente varía entre -2°C y +15°C, con elevada humedad relativa, es decir, diferencias pequeñas entre temperatura y temperatura del punto de rocío cercana.

“El *ground icing* es la contaminación de hielo sobre cualquier superficie de la aeronave que se encuentra en tierra.



¿Cuáles son los efectos de la formación de hielo en las superficies críticas?

La contaminación de los planos produce una pérdida de la performance de la aeronave debido a:

- La pérdida de sustentación.
- El incremento del peso.
- El incremento de la resistencia aerodinámica.
- La reducción del empuje disponible (caso engelamiento tipo *ice-crystal icing*).
- La reducción del ángulo de ataque para la entrada en pérdida.

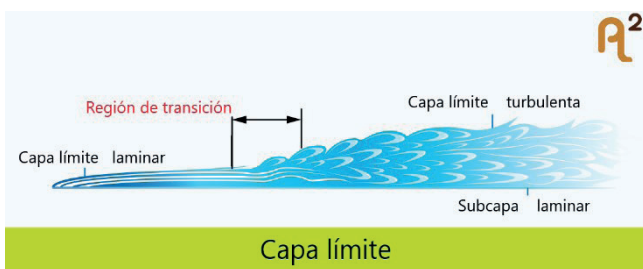
Factores contribuyentes para que se produzca el *ground icing*

- La temperatura.
- La cantidad y el tipo de combustible en los tanques.
- Tipo y ubicación de los tanques.
- El tiempo de vuelo a altos niveles.
- La temperatura del combustible al repostar y el tiempo transcurrido desde la recarga.

Las áreas críticas más afectadas son los bordes de ataque de las alas, los estabilizadores vertical y horizontal, junto a los timones de dirección (rudder) y de profundidad (elevador). La contaminación en estos planos cambia el flujo de aire desprendiendo de la capa límite alar, creando un flujo turbulento y la restricción del movimiento de las superficies móviles (slats, flaps, alerones, rudder, elevador y tabs).

En los helicópteros, la acumulación de hielo puede afectar el rendimiento de las palas del rotor principal, como así también su estructura. Un rotor contaminado puede perder hasta un 50 % de su capacidad de sustentación comparado con un rotor limpio. Además, el hielo acumulado en las palas, al girar, puede desprenderse y producir daños al personal o material.

Figura 2. Capa límite



Fuente: <https://www.aprendamos-aviacion.com/2021/08/vuelo-alta-velocidad.html>

¿Cómo se identifican las señales de contaminación?

Los informes meteorológicos se utilizan para ayudar a anticipar la contaminación por congelamiento en el suelo y en el aire. Temperaturas debajo de los 15°C y temperatura del punto de rocío cercana pueden dar indicios de formación de hielo, aunque no haya precipitación.

“Las áreas críticas más afectadas son los bordes de ataque de las alas, los estabilizadores vertical y horizontal.”



Conclusiones

En resumen, la formación de hielo en aeronaves en tierra es un desafío importante que requiere atención y cuidado. Con prácticas preventivas adecuadas y una comprensión clara de los riesgos involucrados, podemos garantizar la seguridad y eficiencia de nuestras operaciones aéreas.

Buenas prácticas para prevenir y mitigar sus efectos

- Pasar la mano por la superficie para ayudar a identificar si hay formación de hielo o no. El tacto también ayudará a determinar si una capa de agua se ha congelado, formando una ligera capa de hielo en alguna superficie de la aeronave. El contacto con las manos es la mejor manera de detectar el hielo claro (clear ice, cold soak).
- Observar en el interior de las tomas de aire de motor y del sistema pitot, donde la deposición de hielo puede ocultarse de la vista. En caso de ala alta o admisión de motor alta, usar escalones u otro equipo de acceso para realizar una inspección visual adecuada.
- Ante condiciones de formación de hielo durante el vuelo, posponer la salida de aquellas naves que no estén certificadas adecuadamente.
- Si se cuenta con líquidos para deshielo o anti-congelantes, verificar las tablas de tiempo para el despegue.
- Para helicópteros, es recomendable mantenerlos bajo un área cubierta o en un hangar cuando sea posible. Si se encuentra al aire libre, utilizar fundas o cobertores que suministrarán

una adecuada protección siempre que se instalen sobre un helicóptero seco. Debido a que no es práctico cubrirlo íntegramente, aquellas partes que queden descubiertas o cerca de los bordes del cobertor requerirán una inspección más detallada.

- En helicópteros equipados con esquíes, verificar que no se haya formado hielo entre la superficie de apoyo de los esquíes y los tubos, ya que podría ser necesaria una mayor potencia para despegar, lo que podría provocar una maniobra brusca. En caso de que no se pueda eliminar el hielo, es recomendable iniciar un ascenso estacionario y, cuando se encuentre "liviano sobre los esquíes"¹, mover suavemente el helicóptero sobre su eje vertical con una pequeña aplicación en ambos pedales (guiñada), para intentar quebrar el hielo que se encuentre entre el suelo y los tubos de los esquíes.

Para más información, consultar la Alerta de Seguridad Operacional sobre formación de hielo en tierra a través del siguiente QR:

<https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/09/ground-icing11.pdf>



Bibliografía

Junta de Seguridad en el Transporte; Servicio Meteorológico Nacional (2023). Alerta de Seguridad Operacional: Formación de hielo en tierra. Dirección Nacional de Investigación de Sucesos Aeronáuticos.

Transportation Safety Board [TSB] (2023). Guidelines for Aircraft Ground Icing Operations. Issue 8. Transport Canada



¹ Es un término que se refiere a cuando el helicóptero empieza a poner potencia y comienza a elevarse, pero todavía no despegaron totalmente los esquíes del piso.

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Accidentología vial. Animales sueltos en rutas y caminos adyacentes

Road accidents. Loose animals on routes and adjacent roads

Sebastián B. Hnatiuk

Auditor especialista en procesos de calidad de gestión y en procesos ambientales

sbhnatiuk@gmail.com

Pablo N. Tarpinian

Especialista en diseño de urbanismo y arquitectura

nazarethtarpinian@gmail.com

Palabras clave:

Medioambiente, Seguridad Operacional, Transporte Multimodal, Atropellamiento de Animales, Impacto Ambiental.

Keywords: *Environment, Safety, Multimodal Transportation, Animal Trampling, Environmental Impact.*

Recibido: 23/04/24

Aceptado: 01/06/24

Resumen

En las rutas nacionales argentinas y los caminos adyacentes se producen miles de accidentes de transporte cada año por el atropello de animales silvestres y semovientes. Las estadísticas indican que, a pesar de los esfuerzos y de las campañas de concientización, el número de sucesos va en aumento. En este artículo se repasan las principales variables que intervienen en la problemática a partir de un análisis fundado en estadísticas.

Por otro lado, se exploran distintas estrategias para la mitigación y la prevención desde una mirada que parte del paradigma de la seguridad operacional, es decir, que no se abordan estos hechos como siniestros ni se buscan responsabilidades, sino que se los enmarca dentro de una perspectiva sistémica.

Abstract

Thousands of transportation accidents occur every year on Argentina's national highways and adjacent roads due to vehicles running over wild animals and livestock. Statistics show that, despite the efforts and awareness campaigns, the number of accidents is increasing. This article reviews the main variables involved in the problem from an analysis based on statistics.

On the other hand, different strategies for mitigation and prevention are explored from an operational safety paradigm, i.e., these events are not approached as sinisters and responsibilities are not sought, instead, these accidents are framed within a systemic perspective.

El atropellamiento es una de las principales amenazas para la conservación de muchas especies en Argentina y un riesgo para la seguridad en el transporte. Por un lado, de acuerdo con las estadísticas de Vialidad Nacional, el 30 % de los sucesos son colisiones frontales, lo cual pone de manifiesto el escaso tiempo de reacción que tienen los conductores desde que divisan el peligro. Se estima que un 42 % realiza una maniobra evasiva y no consigue evitar la colisión lateral, mientras que apenas un 28 % representa a conductores que tuvieron tiempo de reacción suficiente para evitar la colisión, pero no así las salidas de vía, los vuelcos y las caídas.

Relevamiento estadístico

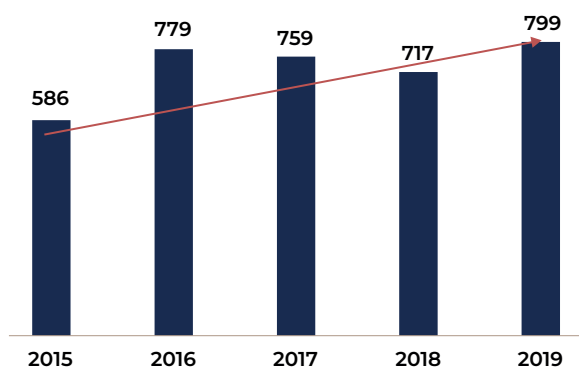
Según el último informe de Vialidad Nacional, publicado en enero de 2022, hubo 3640 accidentes viales con atropello de animales entre 2015 y 2019, en los cuales fallecieron 82 personas. Estos datos tienen en cuenta tanto las autopistas como rutas nacionales.

Los tipos de accidentes originados por los animales sueltos se pueden dividir en:

1. Los que generan los animales domésticos o mascotas.
2. Los producidos por el ganado errante, ya sea que hayan escapado de un campo o que deambulen por las banquetas en busca de pastaje.
3. Los provocados por animales silvestres.

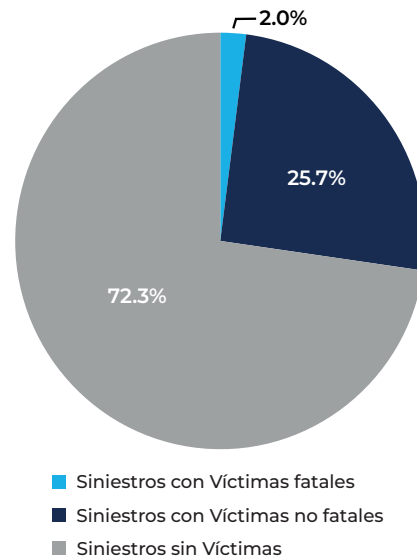
Los estudios reflejan que la mayor cantidad de vehículos involucrados son aquellos que levantan mayor velocidad en las rutas. En este sentido, los automóviles protagonizan el 50 % de los hechos, las camionetas el 24 %, las motocicletas el 14 % y el 12 % restante se divide entre colectivos, camiones y otros vehículos.

Figura 1. Evolución cantidad de siniestros viales que involucran atropello de animales en calzada en rutas nacionales y autopistas del país.



Fuente: Sistema de Información de Accidentes de Tránsito (SIAT) de Vialidad Nacional, período 2015-2019

Figura 2. Siniestros viales que involucran atropello de animales en calzada en rutas nacionales y autopistas del país según resultado.



Fuente: Sistema de Información de Accidentes de Tránsito (SIAT) de Vialidad Nacional, período 2015-2019

La urbanización de sectores rurales: características e implicancias

La problemática abordada en este artículo se agrava con la urbanización de sectores rurales, ya que esta multiplica la presencia de animales en los caminos provinciales y nacionales. Estos causan frenadas, maniobras bruscas y accidentes. La relación entre los modelos territoriales y la demanda de la movilidad urbana confiere al planeamiento un papel fundamental al momento de desarrollar políticas de transporte. En otras palabras: los proyectos viales no solo impactan en las personas, sino también en la flora y fauna circundante. La fragmentación del hábitat ocurre cuando un ambiente natural es transformado de manera tal que queda dividido en fragmentos o "parches" aislados entre sí. Es una de las principales causas de la pérdida de biodiversidad y puede conducir a algunas especies a la extinción (Fundación Vida Silvestre, 2024).

En consecuencia, la comprensión de los posibles impactos ambientales y territoriales de una obra vial se torna esencial. El territorio es una expresión compleja que combina tanto los componentes como sus procesos internos: grupos sociales, relaciones y conflictos. El territorio o espacio geográfico es un lugar donde se desarrollan procesos naturales y donde se despliegan, a la vez, procesos sociales, cuya combinación lo torna más complejo que cualquier visión analítica profunda de sus componentes (Bozzano, 2000).

El esquema de toma de decisiones y el estudio de las incidencias del proyecto sobre el territorio permiten prever y manejar los potenciales impactos territoriales

que cada proyecto podría generar. El territorio no es inicialmente neutro frente a las transformaciones de la red viaria. Por una parte, la orografía y la red fluvial actúan como limitadores de los trazados posibles. Por otra parte, los caminos a los que sustituye la nueva red y los núcleos formados en torno a ella condicionan los nuevos trazados. El territorio, además, tiene su historia, y cada construcción histórica sobre él ha dejado sus huellas (Nardiz, 1993).

Al intentar entender la dinámica del territorio existen muchos enfoques, sin embargo, uno de los más interesantes nos propone comprenderlo como una estructura llena de interrelaciones a partir de redes. Las relaciones van configurando un determinado orden espacial. En ese sentido, existe una doble realidad del territorio: por un lado, se encuentran las unidades espaciales integradas a la red, lo que les permite tener una condición de espacios ganadores, ya que forman parte de los nuevos procesos estructuradores del territorio y de su desarrollo. Por otra parte, tenemos unidades no integradas a la red, las cuales son consideradas perdedoras puesto que se hallan sumidas en una situación desfavorable y constituyen unidades imposibilitadas de acceder al desarrollo (Seguí, 1991).

“El atropellamiento es una de las principales amenazas para la conservación de muchas especies en Argentina y un riesgo para la seguridad en el transporte.”



Las estructuras desarrolladas (carreteras) se convierten en barreras para muchas poblaciones silvestres (flora y fauna), que requieren movilizarse de un lugar a otro en busca de alimentos, territorios y reproducción (Forman y Alexander, 1998). El efecto barrera genera que las poblaciones se dividan y se reduzcan, lo que provoca una pérdida en la variabilidad genética (reproducción entre parientes). Otras posibles consecuencias para la fauna son los atropellamientos y el aislamiento de determinadas poblaciones. Se estima que, en Argentina, más de 5000 animales mueren al año por esta problemática en rutas que atraviesan áreas protegidas. Las especies afectadas van desde lagartos, aves y pequeños mamíferos hasta animales de gran tamaño como pumas, tapires o yagaretés (Fundación Vida Silvestre, 2024).

Sumado a esto, existe un impacto indirecto de los proyectos viales: la apertura de frentes de colonización, que puede generar en el mediano y largo plazo la reconversión en el uso del suelo, la destrucción de hábitats naturales y la reducción de la biodiversidad.

Factores que influyen en el atropellamiento

El índice de atropellamiento y su frecuencia están relacionados con diversos factores, tales como el flujo vehicular, la velocidad, la anchura de la vía, el comportamiento de las especies y la cobertura vegetal (Arroyave et al., 2006). Por ejemplo, en carreteras santafesinas, investigadores de la Universidad Nacional del Litoral (UNL) relevaron una tasa anual de 56 animales atropellados por kilómetro de asfalto entre 2007 y 2008. En total, fueron 2024 vertebrados de la fauna local los que se encontraron en tres tramos de 1000 metros cada uno en un período de un año, tanto en la Ruta Provincial 1 como en la Ruta Nacional 168 (UNL Noticias, 2011).

Cupul (2002) describe que ciertos patrones estacionales de conducta, como el cortejo, las migraciones, la reproducción, el apareamiento, la abundancia de especies y la búsqueda de alimentos, entre otros, hacen posible que haya una mayor cantidad de animales muertos en la vía en determinados períodos del año.

Otro factor importante que incide en la cantidad de accidentes es la nocturnidad. Al respecto, un informe sobre los atropellamientos de fauna en las rutas del parque nacional Iguazú determinó que un 73,5 % de los animales fueron atropellados en condiciones de nocturnidad (Gnazzo, 2015). Durante las horas nocturnas, los animales perciben menos movimiento y sonido, y tienen menor posibilidad de prever una situación de riesgo. Lo mismo sucede con quienes conducen vehículos: la noche disminuye las oportunidades de previsión y altera el tiempo de reacción.

Las velocidades de los vehículos en las autopistas también contribuyen al aumento de la accidentología con animales sueltos. Según un estudio realizado en el Parque Nacional Yellowstone en Estados Unidos, la implementación de señalización para restringir la velocidad disminuye la cantidad de casos de animales muertos. (Gunther et al., 2001)



Asimismo, la experiencia ha demostrado que, en un principio, las autovías y autopistas resultan ser un poderoso elemento reactivador de la actividad empresarial y económica. “Es cierto que, al aumentar la velocidad y reducir la distancia temporal, este tipo de vías aumentan inicialmente la fluidez del espacio y reducen también progresivamente los costos de desplazamiento” (Seguí, 1991: 20). No obstante, no hay que olvidar que una red vial podría estar continuamente presionando los recursos ambientales cercanos y que, cuando esta presión sobre los recursos excede la capacidad propia de su recuperación, la situación se traduce en impactos.

Tipos de accidentes y sus características

Suceso con animales silvestres

El suceso vial vinculado con el atropello de fauna silvestre se asocia con animales como reptiles, mulitas o armadillos, ciervos, jabalíes y zorros, entre otros, ya que también varía según el territorio. En este caso particular, y a diferencia de lo que ocurre con los animales domésticos y el ganado, el tipo de fauna silvestre suele presentar dificultades a la hora de trabajar en la prevención. Al ser animales salvajes, tienden a escapar de lo que desconocen, lo que usualmente hacen de manera veloz durante la noche, ahuyentados por el ruido de los motores y las luces de los vehículos.

En general, el momento de su aparición es repentino, lo que da muy poco margen de maniobra para esquivarlos y crea sorpresa en los conductores. En muchos casos, las personas resultan heridas por el despiste del vehículo y no por la colisión contra el animal. En épocas invernales, como las noches son más extensas, aumenta la aparición de este tipo de fauna. La disminución imprevista de la velocidad sobre la ruta o los “volantazos” de evasión suelen ser maniobras para evitar el atropello del animal, pero que ocasionan daños a terceros.

La conectividad del paisaje permite que los animales puedan desplazarse para encontrar comida, agua, refugio y parejas, pero la reorganización del entorno como producto de la expansión urbana, a la que se suma el cambio climático, presenta nuevos obstáculos para la fauna, que debe movilizarse distancias cada vez más largas por territorios a veces desconocidos. La construcción de infraestructuras como carreteras y autopistas tiende a fragmentar sus hábitats naturales, exponiéndolos a ser atropellados.

Al mismo tiempo, las rutas suelen ser un elemento “atractivo” para ciertos animales. Los reptiles —como las culebras, lagartos e iguanas—, al ser de sangre fría, requieren regular su temperatura corporal mediante la absorción de calor del ambiente, por lo cual se

acercan a las carreteras para aprovechar lo que emana del pavimento tanto en el día como en la noche. Algunos mamíferos se aproximan a consumir las sales que se aplican para descongelar el hielo en las vías, y los ciervos y otros herbívoros se alimentan de la vegetación que crece junto a la carretera. También se ven amenazados los carroñeros —como buitres, cuervos, coyotes y mapaches—, que se acercan al corredor de tránsito para comer los restos de animales muertos. Además, los residuos orgánicos arrojados a la carretera son fuente de alimento para distintas especies.

“Las velocidades de los vehículos en las autopistas también contribuyen al aumento de la accidentología con animales sueltos.”



Suceso con animales semovientes

El atropello de semovientes (animales con dueños) como el ganado vacuno, ovino o equino suele generar accidentes viales de gran magnitud en términos de morbimortalidad, ya que los vehículos, sobre todo los automóviles y motocicletas, no tienen preparada su carrocería para recibir impactos frontales contra este tipo de cuerpos. Habitualmente, el impacto se da de manera lateral hacia las patas del animal. Inmediatamente después, su gran masa corporal se monta sobre el capó y golpea contra el parabrisas, zona muy débil desde lo estructural. Esta clase de sucesos pueden generar lesiones directas sobre los ocupantes aun en impactos a baja velocidad.

El artículo 160 de la Ley de Tránsito (numeral 11) prohíbe dejar animales sueltos o amarrados de forma tal que pudieran obstaculizar el tránsito, y establece que el cruce de animales de uno a otro lado de la vía solo podrá hacerse en lugares autorizados y previamente señalizados. La norma indica que los dueños u ocupantes de predios con acceso a las vías públicas deben mantener en buenas condiciones los cercos y las puertas para evitar la salida del ganado, como así también prescribe que el arreo de animales por los caminos nacionales solo se puede efectuar con el permiso de la autoridad correspondiente.

Medidas preventivas y de mitigación

Con el objetivo de combatir esta problemática, prevenir sucesos y mitigar el riesgo, existen distintos mecanismos. Vale destacar que la accidentología

vial con atropellamiento de animales es un fenómeno complejo que solo puede abordarse desde la seguridad operacional a partir de distintos ángulos. Por un lado, atendiendo a la problemática que atañe a quienes conducen y facilitando barreras defensivas (capacitación, cartelera, normativa, etc.). Por otro lado, es necesario pensar en el impacto que estos sucesos causan a nivel ambiental y qué iniciativas de carácter sistémico existen para mitigarlo (tecnología, infraestructura, políticas públicas, etc.). A los fines de facilitar el análisis, se dividieron las principales medidas en dos grandes grupos:

- Las que facilitan las conexiones: estas reducen directamente la fragmentación, conectando los hábitats divididos por la infraestructura. Algunos ejemplos son los pasos adaptados (drenajes, pasos de vías pecuarias, etc.) y aquellos específicos para la fauna (ecoductos, pasos superiores, inferiores, etc.).
- Las que reducen la mortalidad: estas ayudan a la mejora de la seguridad de la carretera y la reducción del impacto del tráfico en las poblaciones de animales. Además, disminuyen la mortalidad relacionada con los atropellos y las colisiones con vehículos. Entre estas iniciativas se destacan los vallados y dispositivos de disuasión, las señales de advertencia y aquellas con sensores de detección de fauna.

La Red Argentina de Monitoreo de Fauna Atropellada (RAMFA) une los esfuerzos de numerosas instituciones y particulares para coleccionar, reunir, curar y comunicar de forma abierta la información sobre registros de atropellamientos de fauna en el territorio nacional. Se trata de una iniciativa interinstitucional y abierta de monitoreo participativo.

“Es necesario pensar en el impacto que estos sucesos causan a nivel ambiental y qué iniciativas de carácter sistémico existen para mitigarlo.



Según la RAMFA, el impacto de la infraestructura vial sobre la biodiversidad es un tema de creciente interés a nivel global. Los atropellamientos de animales son una de las principales causas de mortalidad de la fauna silvestre en todo el mundo, y se han convertido

en un problema cada vez más importante debido a la expansión de la red de infraestructura vial y al aumento del tráfico vehicular.

Ecoductos y pasos superiores e inferiores de fauna

Un interesante ejemplo del potencial que tienen las medidas de prevención y mitigación de magnitud se encuentra en la Ruta Nacional 101, provincia de Misiones, donde está ubicado el primer ecoducto construido en Sudamérica. Fue creado gracias al impulso de un equipo de científicos liderados por Diego Varela, licenciado en Ciencias Biológicas e investigador del CONICET¹. Se trata de una construcción que permite que la selva cruce la ruta mediante un corredor biológico para la fauna. Se implementó en el 2010 como medida de mitigación ante la pavimentación de la zona. Además, desde el 2010, Diego Varela lidera un proyecto de ecología de rutas en la provincia de Misiones, cuyo objetivo es estudiar los impactos de las rutas sobre la fauna silvestre y monitorear la efectividad de las distintas medidas de mitigación. En el informe del proyecto se destaca que los pasos de fauna cumplen una doble función: reducen el atropellamiento de animales y permiten la conectividad ecológica en paisajes naturales fragmentados por rutas. Por otro lado, se sostiene que la cartelera, si bien siempre es necesaria, ha demostrado tener muy poca efectividad para reducir los atropellamientos. Sin estudio y monitoreo no es posible evaluar la eficacia de otras medidas de mitigación como los radares de fotomultas y los reductores de velocidad.

Figura 3. Ecoducto de Misiones, vista aérea



Fuente: Derecho en Zapatillas

Por último, en 2019, se formó el Grupo de Trabajo de Transporte para América Latina y el Caribe (LACTWG), esta iniciativa impulsada por biólogos y profesionales del transporte busca disminuir la mortalidad de la fauna haciendo que los sistemas de transporte sean amigables con la biodiversidad de la zona.

¹ <https://www.conicet.gov.ar/sector-publico/>

Señalética y dispositivos de disuasión

Como se mencionó, los principales estudios en la materia indican que quienes conducen no prestan mucha atención a las señales y no reducen la velocidad. Por ello, se han desarrollado otros sistemas que aumentan su eficacia, por ejemplo: señalizaciones de advertencia con sensores de detección de fauna. Este tipo de señales se combinan con sensores de calor que detectan la aproximación de animales, especialmente grandes mamíferos, a una distancia de unos 250 m, y activan la iluminación destellante de las señales de advertencia, así como las de limitación de velocidad.

Por su parte, los dispositivos artificiales de disuasión son artefactos que tienen como objetivo impedir que se acerquen los animales (en general mamíferos) a las carreteras. Algunos ejemplos son los acústicos, que emiten ultrasonidos para ahuyentar a los mamíferos, y los repelentes olfativos, una medida que utiliza sustancias artificiales o naturales. Normalmente, la sustancia es una mezcla de aromas (humanos, lobos y otros animales depredadores), este compuesto se inyecta en una resina sintética que actúa como soporte y se aplica en los árboles y postes situados en los márgenes de las carreteras.

Imagen 2. Dispositivos artificiales de disuasión y señalética inteligente.



Fuente: *El Confidencial*, diario

Recomendaciones estándar para conductores

A continuación, algunas recomendaciones a la hora de conducir en rutas nacionales y caminos adyacentes. Se trata de un listado no exhaustivo que fue confeccionado por el equipo de investigación a partir de distintas fuentes especializadas en la materia:

- Respetar las velocidades de tránsito señaladas.

- Atender y respetar las señales de tráfico que advierten sobre el posible cruce de animales.
- Extremar la precaución por la noche, al amanecer y al atardecer. Esas horas del día concentran muchos de los factores que hacen que el riesgo de atropello se dispare, entre ellos, el gran número de animales que tienen hábitos nocturnos.
- Disminuir la velocidad ante la presencia de animales sobre las banquetas, ya que es probable que decidan cruzar la calzada. Si se mueven en ese sentido, frenar.
- Tener en cuenta que las luces bajas de un automóvil convencional alumbran solo unos pocos metros.
- Si hay un animal atravesado en la carretera, frenar sujetando fuertemente el volante y manteniendo la dirección. También evitar alumbrar al animal con las luces altas para que no se desoriente. Hacer sonar la bocina para que salga de la calzada.
- Tener en cuenta que muchos animales se desplazan en grupo; por lo tanto, si un animal se acerca a la calzada, es probable que otro u otros lo sigan.
- No dar un volantazo: si el animal ya está cruzando por la carretera y no se tiene margen de reacción, evitar maniobras bruscas, ya que se corre el riesgo de salir de la carretera o colisionar contra otro vehículo, un árbol o cualquier estructura próxima. Lo más adecuado es frenar lo máximo posible sin perder la dirección del vehículo y seguir de frente siempre y cuando el animal no sea de gran envergadura (caballo, corzo o similar). En ese caso, se recomienda esquivar al animal de forma segura y prudente.
- Parar en un lugar seguro: si se ha producido el atropello, se debe parar en un lugar seguro donde el vehículo sea visible para otros conductores. Para ello, es necesario utilizar chaleco reflectante, luz de emergencia V16 o los triángulos de emergencia a cada lado del coche, y ubicarse detrás del guardarraíl, de ser posible, para estar más protegido.
- En caso de circular por autopista y encontrarse con animales sueltos, comunicarse con el teléfono de emergencias del corredor vial correspondiente o avisar en las estaciones de peaje. En rutas nacionales o provinciales, comunicarse con el 911.

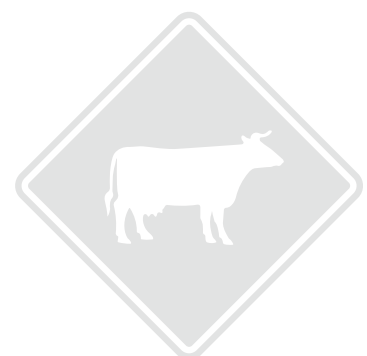
Conclusiones

A lo largo de este artículo se delinearon las principales aristas de la problemática en torno al atropellamiento de animales en carreteras nacionales. Se trata de un asunto que trae aparejadas consecuencias importantes para la seguridad operacional y cuyos efectos impactan no solo en los factores humanos y de infraestructura, sino también en el ambiente.

Se repasaron las distintas estrategias de abordaje posibles para prevenir estos sucesos y mitigar el peligro que acarrear. No obstante, cualquier iniciativa que se tome será ineficaz si no se trabaja desde una perspectiva sistémica que entienda al problema desde una mirada sistémica que ponga el foco en la complejidad e interrelación de los distintos factores que entran en juego en los sistemas sociotécnicos modernos.

Bibliografía

- Arroyave, M. D., Gómez, C., Gutiérrez, M. E., Múnera, D. P., Zapata, P. A., Vergara, I. C., Andrade, L. M., & Ramos, K. C. (2006). "Impactos de las carreteras sobre la fauna silvestre y sus principales medidas de manejo". *Revista EIA*, (5), 45-57.
- Bozzano, H. (2000). *Territorios reales, territorios pensados, territorios posibles. Aportes para una Teoría Territorial del Ambiente*. Ed. Espacio, Buenos Aires.
- Cupul, F. (2002). *Víctimas de la carretera: fauna apachurrada*. Gaceta CUC. Departamento de Ciencias. Centro Universitario de la Costa. México.
- Forman, R. T.; Alexander. L. E. (1998). "Roads and their major ecological effects". En: *Annual Review of Ecology and Systematics* 29: 207-231.
- Fundación Vida Silvestre (2024). *Atropellamiento: una seria amenaza para la fauna*.
- Gnazzo, Victoria; Gil, Guillermo (2016). *Análisis de atropellamientos de fauna en las rutas del parque nacional Iguazú*.
- Gruber, T.; van de Waal, E. (2023). "Striking pay dirt: Contemporary methods for studying animal sociality in the wild". *Methods Ecol Evol*, 14: 1838-1841. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.14178>
- Gunther K., Biel, M. J. and Robison, H. L. (2001). "Influence of vehicle speed and vegetation cover-type on road-killed wildlife in Yellowstone National Park". pp. 42-51. En: *Wildlife and highways: seeking solutions to an ecological and socio-economic dilemma*. 7th Annual Meeting of the Wildlife Society. Nashville, Tennessee. 178p.
- Nardiz, Carlos (2008). "La representación del territorio en los Planes históricos de la red viaria". *Revista de Obras Públicas. Órgano de los ingenieros de caminos, canales y puertos*.
- Pomareda, García; Esther Idalia (2015). *Guía ambiental: vías amigables con la vida silvestre*. Comité Científico de la Comisión Vías y Vida Silvestre
- Seguí, Joana (1991). *Geografía de Redes y Sistemas de Transporte*. Editorial Síntesis.
- Universidad Nacional del Litoral (2011). *Animales atropellados: otra forma de impacto ambiental*. Publicado el viernes 16 de septiembre de 2011. Recuperado el 14 de junio de 2024



Convocatoria para la recepción de artículos para la Revista de Seguridad Operacional

JST | EDICIONES



La propuesta editorial de la revista reúne notas de opinión, reseñas y artículos técnicos de investigación en relación con la seguridad operacional de todos los modos de transporte, y su vinculación con distintas disciplinas y temáticas: ambiente, género, víctimas, interés nacional e internacional, economía, gestión, sociología, entre otras.

Invitamos a investigadores, investigadoras y profesionales a enviar artículos técnicos para formar parte de RSO, la revista sobre seguridad operacional multimodal de la JSTEdiciones.

Normas de estilo y directrices: www.argentina.gob.ar/jst



RSO

REVISTA SEGURIDAD OPERACIONAL

JST | EDICIONES

ediciones@jst.gob.ar