

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

<https://orcid.org/0000-0003-3605-2999>

Cheng Luo

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

luocheng@zjut.edu.cn

<https://orcid.org/0000-0003-2893-3753>

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.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

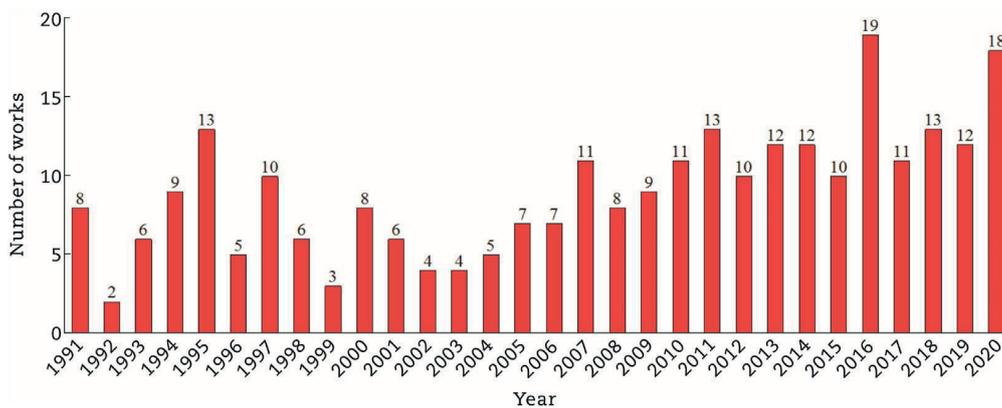
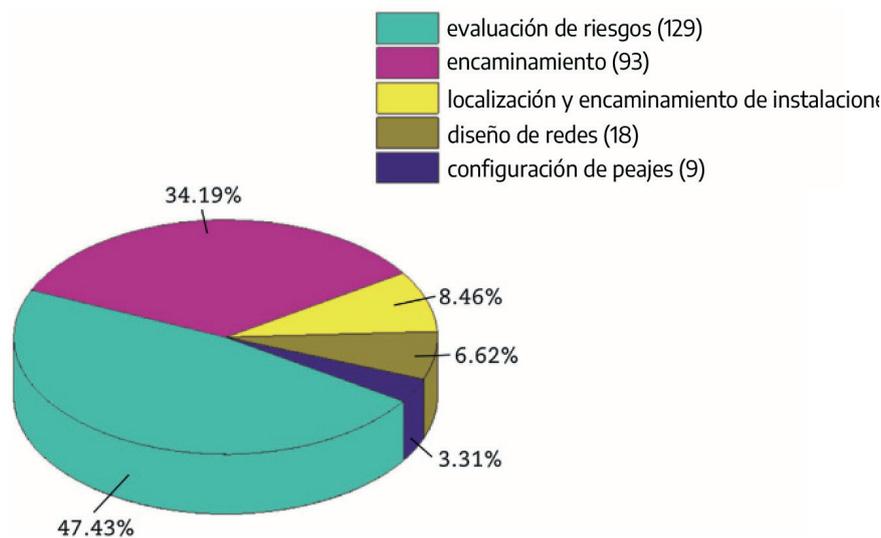
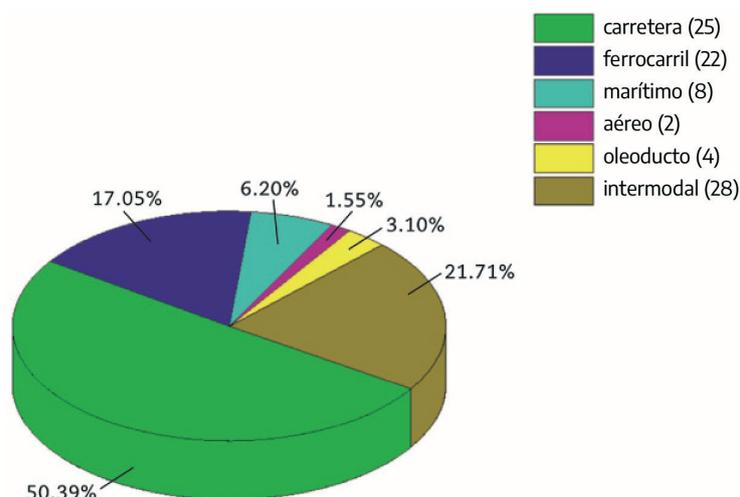


Figura 2. Número de contribuciones basadas en diferentes aspectos



(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 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-costo.

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^* 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 monotonidad de evaluación de trayectorias, (2) axioma de monotonidad 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-coste. 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. Contradiendo 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

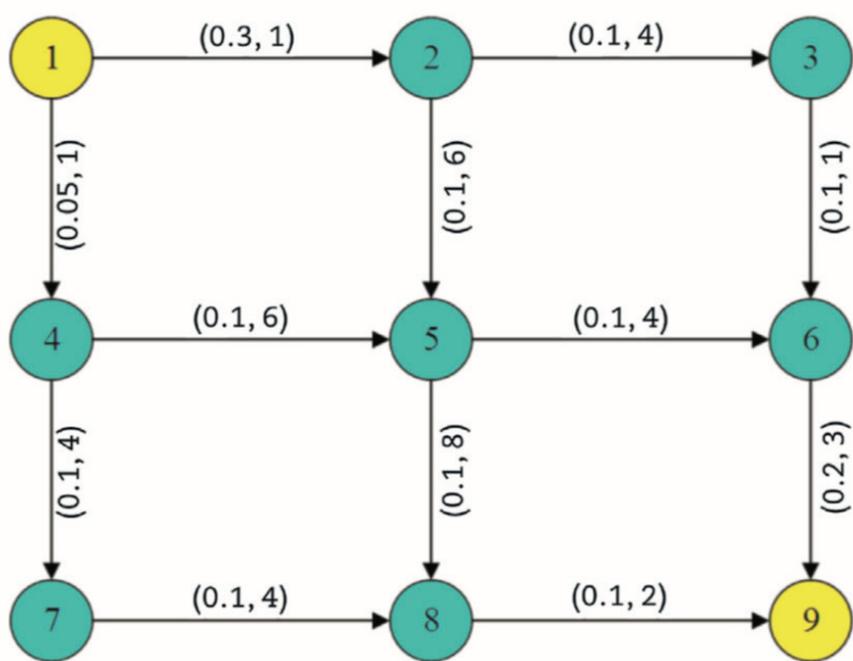
Considerando el trayecto 1 (P1) como ejemplo, obtuvimos la siguiente función de distribución acumulativa del riesgo.

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

El VaR correspondiente de P1 puede calcularse como sigue.

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

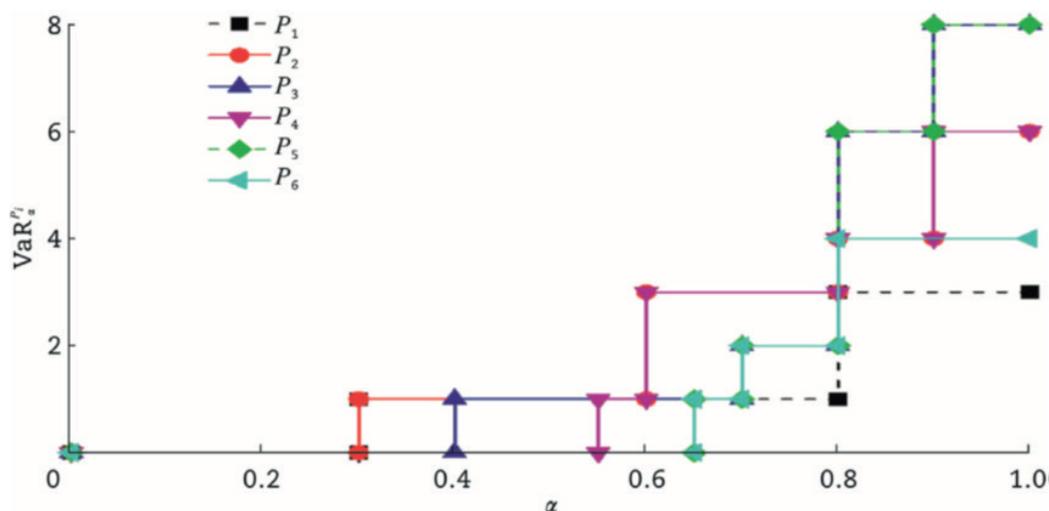
Figura 3. Red modificada para el transporte de materiales peligrosos



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 analysis 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 revisitiation 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 análisis 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.