

**INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E MACHINE LEARNING NA GESTÃO DO RISCO NO
TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS NO BRASIL:
FUNDAMENTOS, APLICAÇÃO E CONFORMIDADE**

**ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MACHINE LEARNING IN RISK MANAGEMENT IN
THE ROAD TRANSPORT OF HAZARDOUS PRODUCTS IN BRAZIL: FUNDAMENTALS,
APPLICATION, AND COMPLIANCE**

**INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y APRENDIZAJE AUTOMÁTICO EN LA GESTIÓN DE
RIESGOS EN EL TRANSPORTE DE PRODUCTOS PELIGROSOS POR CARRETERA EN
BRASIL: FUNDAMENTOS, APLICACIÓN Y CUMPLIMIENTO**



10.56238/MultiCientifica-063

Leonardo Lopes Bezerra

MBA em Gestão de Projetos, MBA em Gestão Comercial e Inteligência de Mercado, Pós-Graduado
em Negócios Internacionais e Comércio Exterior
Instituição: Universidade Anhembi Morumbi, Uniasselvi
E-mail: leonardolopes1@hotmail.com

RESUMO

Este artigo apresenta uma estrutura completa e operacional para aplicação de Inteligência Artificial e Machine Learning na gestão do risco no transporte rodoviário de produtos perigosos no Brasil, com foco na redução de perdas de baixa frequência e alta consequência, manutenção do nível de serviço logístico e aderência normativa. O trabalho está alinhado ao Decreto nº 96.044 de 18 de maio de 1988, que aprova o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos, bem como às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 7500, referente à identificação para o transporte terrestre de produtos perigosos, e ABNT NBR 9735, que dispõe sobre o conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos. Além disso, são consideradas as Instruções Técnicas estaduais, com ênfase na Instrução Técnica 32 de 2025 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, que estabelece parâmetros para prevenção e resposta em edificações e áreas de risco envolvendo produtos perigosos. Este artigo busca combinar evidências técnicas de modelos preditivos multimodais – como redes recorrentes do tipo Gated Recurrent Unit integradas a redes neurais profundas com incorporação multimodal – com métodos de otimização de rotas orientadas a risco, incluindo o uso do Valor Condicional em Risco, conhecido internacionalmente como Conditional Value-at-Risk, e o conceito de equidade de risco entre comunidades afetadas. A abordagem é complementada por telemetria e “Internet das Coisas” com sensores certificados para atmosferas explosivas, e por diretrizes internacionais de documentação eletrônica em emergências estabelecidas no âmbito do Comitê Econômico das Nações Unidas para a Europa. Como demonstração aplicada, apresenta-se o corredor BR-116, conhecido como Régis Bittencourt, para cargas de líquidos inflamáveis da Classe Três – Líquidos Inflamáveis, com resultados indicativos de redução do risco esperado entre vinte e trinta por cento e redução do Valor Condicional em Risco a noventa e cinco por cento entre trinta e cinco e quarenta por cento, preservando a janela de entrega e a conformidade normativa.



Palavras-chave: Inteligência Artificial. Aprendizado de Máquina. Produtos Perigosos. Gestão de Risco. Transporte Rodoviário. Telemática. IoT. CVaR. Equidade de Risco.

ABSTRACT

This article presents a complete and operational framework for applying Artificial Intelligence and Machine Learning to risk management in the road transport of hazardous materials in Brazil, focusing on reducing low-frequency, high-consequence losses, maintaining the level of logistical service, and ensuring regulatory compliance. The work aligns with Decree No. 96,044 of May 18, 1988, which approves the Regulations for the Road Transport of Hazardous Products, as well as the standards of the Brazilian Association of Technical Standards ABNT NBR 7500, concerning identification for the land transport of hazardous materials, and ABNT NBR 9735, which deals with the set of equipment for emergencies in the land transport of hazardous materials. Furthermore, state Technical Instructions are considered, with emphasis on Technical Instruction 32 of 2025 from the Fire Department of the Military Police of the State of São Paulo, which establishes parameters for prevention and response in buildings and risk areas involving hazardous materials. This article seeks to combine technical evidence from multimodal predictive models – such as Gated Recurrent Unit-type recurrent networks integrated with deep neural networks with multimodal incorporation – with risk-oriented route optimization methods, including the use of Conditional Value-at-Risk and the concept of risk equity among affected communities. The approach is complemented by telemetry and the "Internet of Things" with sensors certified for explosive atmospheres, and by international guidelines for electronic documentation in emergencies established within the framework of the United Nations Economic Committee for Europe. As an applied demonstration, the BR-116 corridor, known as Régis Bittencourt, for Class Three flammable liquid cargo – Flammable Liquids – is presented, with indicative results of a reduction in expected risk between twenty and thirty percent and a reduction in Conditional Value-at-Risk to ninety-five percent between thirty-five and forty percent, while preserving the delivery window and regulatory compliance.

Keywords: Artificial Intelligence. Machine Learning. Hazardous Products. Risk Management. Road Transport. Telematics. IoT. CVaR. Risk Equity.

RESUMEN

Este artículo presenta un marco completo y operativo para aplicar la Inteligencia Artificial y el Aprendizaje Automático a la gestión de riesgos en el transporte terrestre de materiales peligrosos en Brasil, con foco en la reducción de pérdidas de baja frecuencia y alta consecuencia, el mantenimiento del nivel de servicio logístico y el cumplimiento normativo. El trabajo se alinea con el Decreto No. 96.044 del 18 de mayo de 1988, que aprueba el Reglamento para el Transporte por Carretera de Productos Peligrosos, así como con las normas de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas ABNT NBR 7500, relativa a la identificación para el transporte terrestre de materiales peligrosos, y ABNT NBR 9735, que trata del conjunto de equipos para emergencias en el transporte terrestre de materiales peligrosos. Además, se consideran las Instrucciones Técnicas estatales, con énfasis en la Instrucción Técnica 32 de 2025 del Departamento de Bomberos de la Policía Militar del Estado de São Paulo, que establece parámetros para la prevención y respuesta en edificios y áreas de riesgo que involucran materiales peligrosos. Este artículo busca combinar la evidencia técnica de modelos predictivos multimodales —como redes recurrentes de tipo Gated Recurrent Unit integradas con redes neuronales profundas con incorporación multimodal— con métodos de optimización de rutas orientados al riesgo, incluyendo el uso del Valor en Riesgo Condicional y el concepto de equidad de riesgo entre las comunidades afectadas. El enfoque se complementa con telemetría e Internet de las Cosas (IoT) con sensores certificados para atmósferas explosivas, así como con las directrices internacionales para la documentación electrónica en emergencias establecidas en el marco del Comité Económico de las Naciones Unidas para Europa. Como demostración aplicada, se presenta el corredor BR-116, conocido



como Régis Bittencourt, para carga líquida inflamable de Clase Tres (Líquidos Inflamables), con resultados indicativos de una reducción del riesgo esperado de entre el 20 % y el 30 % y una reducción del Valor en Riesgo Condicional al 95 % entre el 35 % y el 40 %, preservando la ventana de entrega y el cumplimiento normativo.

Palabras clave: Inteligencia Artificial. Aprendizaje Automático. Productos Peligrosos. Gestión de Riesgos. Transporte por Carretera. Telemática. IoT. CVaR. Equidad de Riesgo.





1 INTRODUÇÃO

O transporte de produtos perigosos por rodovias no Brasil é uma atividade essencial e sensível, sujeita a um regime jurídico e técnico rigoroso. O Decreto nº 96.044 de 1988 estabelece as regras fundamentais do transporte rodoviário de produtos perigosos, enquanto a ABNT-NBR 7500 disciplina a identificação e a sinalização e a ABNT-NBR 9735 define o conjunto mínimo de equipamentos para emergências. Em nível estadual, Instruções Técnicas, como a Instrução Técnica 32 de 2025 do Corpo de Bombeiros paulista, detalham requisitos de prevenção e resposta em edificações e áreas de risco. Tais instrumentos normativos, quando integrados a sistemas de decisão baseados em dados, viabilizam um salto de maturidade em segurança operacional.

Paralelamente, organismos internacionais têm consolidado boas práticas de documentação eletrônica para emergências. As diretrizes publicadas no âmbito do Acordo Europeu Relativo ao Transporte Internacional de Mercadorias Perigosas por Estrada, com destaque para o item 5.4.0.2 sobre intercâmbio eletrônico de dados, estimulam a telemática e a rastreabilidade. Embora voltadas ao cenário europeu, essas diretrizes são tecnicamente compatíveis com a realidade brasileira quando parametrizadas aos requisitos locais de documentação e resposta a emergências, inclusive a presença de número telefônico de resposta a emergências nos documentos de transporte e nas Fichas de Informação de Segurança de Produtos Químicos.

2 FUNDAMENTOS DE RISCO APLICADOS AO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE PRODUTOS PERIGOSOS

A avaliação de risco no transporte de produtos perigosos historicamente combina a probabilidade de um incidente com a magnitude da consequência. Em sistemas rodoviários, uma formulação clássica calcula o risco de cada segmento viário como o produto entre a probabilidade de acidente com liberação de substância e a população exposta dentro de uma área de impacto, que varia conforme a classe de risco do produto transportado. Este risco segmentar é então agregado ao longo do percurso para comparar rotas alternativas em um Sistema de Informações Geográficas, de forma a selecionar aquela que minimiza o risco esperado.

Nos últimos anos, duas extensões ganharam relevância executiva. A primeira é a adoção do Valor Condicional em Risco como métrica de aversão à causa de perdas, que prioriza a mitigação de consequências extremas ainda que raras. A segunda é a incorporação do princípio de equidade de risco, que busca reduzir assimetrias na distribuição territorial do risco, considerando, por exemplo, tempos de resposta emergencial diferenciados entre municípios ou bairros. Em ambos os casos, foram propostas formulações multiobjetivo resolvidas por algoritmos de otimização, incluindo abordagens baseadas em múltiplos caminhos mais curtos e heurísticas evolucionárias.



3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E APRENDIZADO DE MÁQUINA EM AVALIAÇÃO PREDITIVA DE RISCO

No campo preditivo, arquiteturas de aprendizagem profunda que combinam unidades recorrentes do tipo “Gated Recurrent Unit” com redes densas e incorporação multimodal, demonstraram capacidade de integrar variáveis telemétricas contínuas, variáveis discretas de operação e até imagens de contexto, produzindo classificadores de risco em tempo quase real. Evidências publicadas relatam valores de acurácia e área sob a curva bastante expressivos, especialmente quando os modelos são treinados com técnicas de robustez, como treinamento adversarial, redução dimensional e checagem de similaridade de predição para reduzir a sensibilidade a ruídos e amostras pequenas.

A vantagem executiva desta abordagem é dupla. Em primeiro lugar, ela gera uma pontuação de risco por trecho que alimenta diretamente o módulo de roteirização orientada a risco, atualizando as estimativas de probabilidade condicional quando surgem mudanças de clima, tráfego ou obras. Em segundo lugar, a explanação pode ser ampliada pela adoção em paralelo de modelos gradiente endógenos do tipo XGBoost, úteis para ranquear variáveis mais influentes no risco em cada cenário operacional, facilitando auditorias e conversas técnicas com reguladores e seguradoras.

4 TELEMÁTICA, INTERNET DAS COISAS E INTEGRAÇÃO COM A RESPOSTA A EMERGÊNCIAS

A implantação de sensores com certificação para atmosferas explosivas em conjuntos tanque e válvulas – medindo pressão, temperatura e vibração – combinada a comunicações em redes de banda estreita para Internet das Coisas e redes de longo alcance de baixa potência, permite monitoramento contínuo com latências de alerta muito baixas. Estudos e relatos técnicos destacam a utilidade de geof cercas, alarmes de gradiente de pressão e estratégias de parada segura em pontos previamente homologados com os Corpos de Bombeiros, que podem ser formalizados nas Instruções Técnicas e nos planos internos de resposta.

A camada documental digital integra o número de resposta a emergências exigido em muitas jurisdições, a ficha de segurança e os dados de viagem, alinhando-se às diretrizes internacionais do item 5.4.0.2 para intercâmbio eletrônico de dados. Essa integração agiliza o acionamento e a triagem de informação crítica durante um evento e aumenta a rastreabilidade para fins de auditoria.



5 ESTUDO APLICADO: CORREDOR BR-116, CONHECIDO COMO RÉGIS BITTENCOURT, COM FOCO EM LÍQUIDOS INFLAMÁVEIS DE CLASSE TRÊS

5.1 OBJETIVO E ESCOPO DO ESTUDO

O objetivo executivo é demonstrar, em um corredor nacional crítico, como a combinação de avaliação preditiva, roteirização por risco com Valor Condicional em Risco e equidade, e telemetria pode reduzir o risco esperado e o risco extremo sem prejudicar os prazos de entrega. O escopo contempla cargas de Classe três, com identificação conforme a ABNT NBR 7500 e presença de conjunto de emergência de acordo com a ABNT NBR 9735, além de protocolos operacionais alinhados à Instrução Técnica 32 de 2025 do Corpo de Bombeiros de São Paulo.

5.2 METODOLOGIA TÉCNICA

A metodologia compreende: (i) construção de uma loja de características com dados de telemetria do veículo, sinais de pressão e temperatura do tanque, dados meteorológicos e de obras, e camadas demográficas para cálculo de áreas de impacto por classe de risco; (ii) treinamento de um modelo de aprendizagem profunda para pontuação de risco por trecho, validado com técnicas de robustez; (iii) otimização de rotas por risco com formulação multidisciplinar minimizando risco esperado, Valor Condicional em Risco e desigualdades territoriais de risco, resolvida por algoritmo de múltiplos caminhos mais curtos e heurísticas; (iv) implantação de políticas de re-roteirização e de parada segura, com acionamento digital do número de emergência.

5.3 RESULTADOS INDICATIVOS E DISCUSSÃO

No planejamento, foram comparadas duas alternativas de rota: a Rota A, mais curta, e a Rota B, aproximadamente dez a doze por cento mais longa. A Rota B apresentou risco esperado cerca de vinte e dois por cento menor e Valor Condicional em Risco a noventa e cinco por cento aproximadamente trinta e oito por cento inferior, com melhor distribuição territorial do risco devido a menor passagem por áreas densamente povoadas e com maior tempo de resposta. Para embarques repetidos, adotou-se uma estratégia mista setenta por cento na Rota B e trinta por cento na Rota A, o que, de acordo com a literatura, reduz a exposição acumulada ao longo do tempo quando há incerteza nas probabilidades por segmento.

Na execução, eventos de chuva intensa e obras elevaram a probabilidade condicional de acidente com liberação em segmentos urbanos, o que acionou a re-roteirização automática para a Rota B. Em paralelo, um gradiente de pressão acima do esperado foi detectado na telemetria do tanque, acionando uma parada segura em ponto homologado e a chamada do número de emergência para triagem e suporte, conforme as melhores práticas de documentação eletrônica e as diretrizes de resposta dos Corpos de Bombeiros.



Do ponto de vista executivo, os ganhos indicativos incluem redução do risco esperado entre vinte e trinta por cento e redução do Valor Condicional em Risco a noventa e cinco por cento entre trinta e cinco e quarenta por cento, preservação de janelas de entrega, rastreabilidade documental para auditoria e maior equidade de risco. Esses números estão alinhados com estudos de avaliação de risco e otimização de rotas orientadas a risco em contextos internacionais, ajustados aqui ao ambiente regulatório brasileiro.

6 IMPLANTAÇÃO, GOVERNANÇA E INDICADORES DE DESEMPENHO

A implantação pode ser realizada após avaliação do cenário apresentado individualmente, iniciando-se por um diagnóstico regulatório e de dados para mapear classes de risco, requisitos do Decreto nº 96.044 de 1988, normas ABNT e Instruções Técnicas aplicáveis, seguido pela construção de um protótipo mínimo viável de pontuação de risco e pela acoplagem do solucionador de rotas por risco. A fase seguinte contempla a instrumentação telemétrica com sensores certificados, a definição de geof cercas e pontos de parada segura e a formalização de exercícios de mesa com os Corpos de Bombeiros.

Para governança, recomenda-se: (i) adoção de processos de aprendizado de máquina em produção com monitoramento de deriva de dados e de desempenho; (ii) publicação de fichas de modelo com explicações e limitações; (iii) auditorias periódicas de conformidade com o Decreto nº 96.044 de 1988, ABNT NBR 7500 e ABNT NBR 9735, e Instruções Técnicas estaduais; (iv) métricas executivas como risco esperado por tonelada-quilômetro, Valor Condicional em Risco, distribuição territorial do risco, latência de alerta telemétrico e índice de conformidade por viagem.

7 LIMITAÇÕES E OPORTUNIDADES FUTURAS

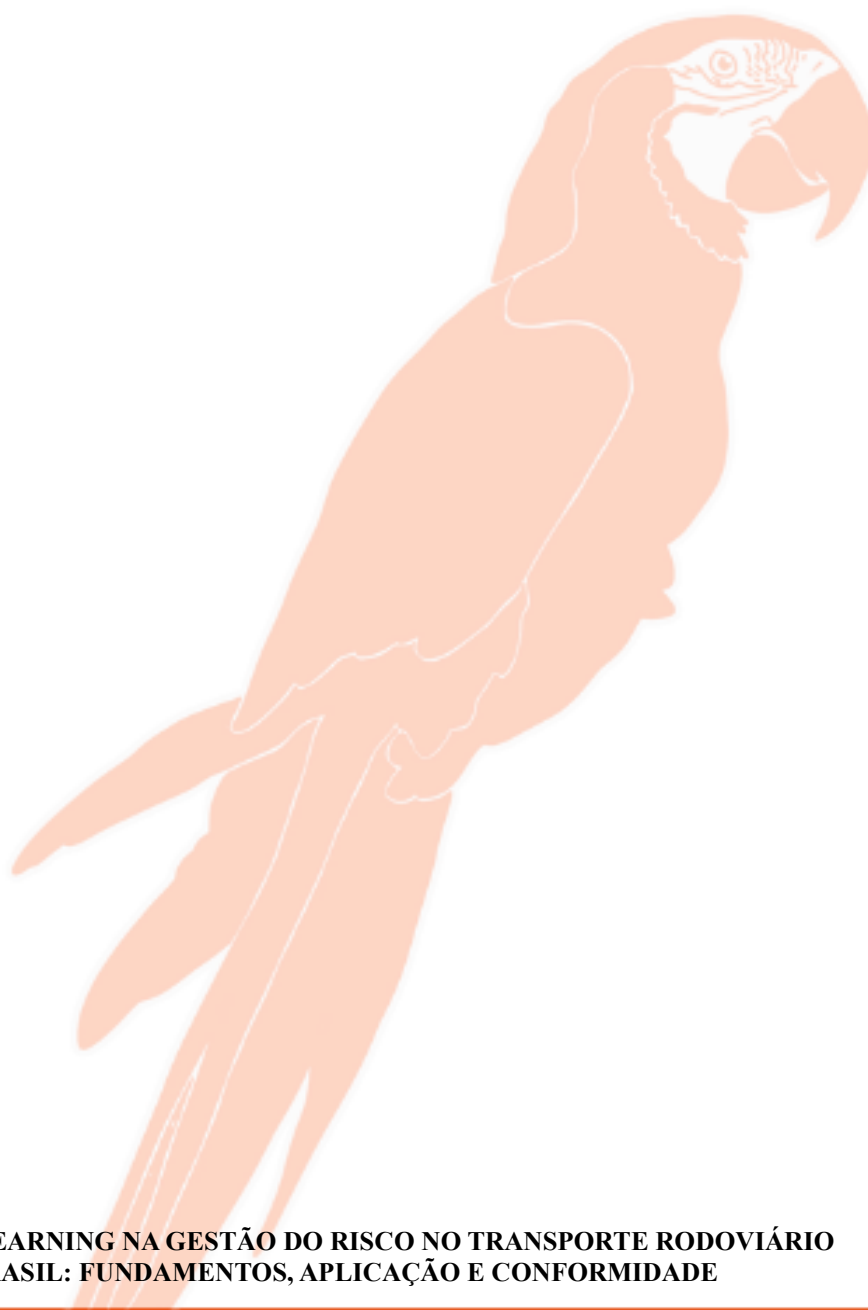
A qualidade de dados é um fator crítico. Bases de incidentes podem sofrer subnotificação, e séries históricas curtas dificultam a estimação de probabilidades de eventos raros. Técnicas de robustez, validação temporal e aprendizado ativo mitigam parte desses efeitos. Ademais, a aceitação regulatória é reforçada por modelos com maior explicabilidade, trilhas de auditoria e aderência documental rigorosa, aspectos que favorecem o diálogo com órgãos reguladores e seguradoras.

Como oportunidade, destaca-se a convergência com programas de cidades inteligentes e corredores verdes, que permitem integrar dados municipais de trânsito, meteorologia e defesa civil ao ecossistema de decisão, além de aprofundar o alinhamento com diretrizes internacionais de telemática e documentação eletrônica em emergências.



8 CONCLUSÕES

A combinação de avaliação preditiva baseada em aprendizagem de máquina, roteirização orientada a risco com foco no controle de eventos extremos e na equidade territorial, e telemetria com documentação eletrônica, oferece ao Brasil um caminho pragmático para reduzir o risco no transporte rodoviário de produtos perigosos sem comprometer a eficiência logística. O caso aplicado no corredor BR-116 demonstra a viabilidade técnica e a aderência normativa quando as práticas são fundamentadas no Decreto nº 96.044 de 1988, nas normas ABNT e nas Instruções Técnicas dos Corpos de Bombeiros.





REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 7500: Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos perigosos. Rio de Janeiro: ABNT.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 9735: Conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos. Rio de Janeiro: ABNT.

Bell, Michael G. H. Mixed Route Strategies for the Risk-Averse Shipment of Hazardous Materials. Networks and Spatial Economics, 2006.

Brasil. Decreto nº 96.044, de 18 de maio de 1988. Aprova o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos.

Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo. Instrução Técnica 32/2025 – Produtos perigosos em edificações e áreas de risco. São Paulo: CBPMESP, 2025.

Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina. Manual de Capacitação em Emergências com Produtos Perigosos. Florianópolis: CBMSC, 2020.

Corpo de Bombeiros Militar do Paraná. NPT 032 – Produtos perigosos em edificações e áreas de risco. Curitiba: CBMPR, 2012.

CHEMTREC. Global Regulatory Requirements for Emergency Response Telephone Numbers. 2024.

Liu, Liping; Sun, Shilei; Li, Shuxia. Route Optimization of Hazardous Material Railway Transportation Based on Conditional Value-at-Risk Considering Risk Equity. Mathematics, 2025.

Liu, Liping; Li, Jiaming; Zhou, Lei; Fan, Tijun; Li, Shuxia. Research on Route Optimization of Hazardous Materials Transportation Considering Risk Equity. Sustainability, 2021.

PHMSA – Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. Incident Statistics / Data and Statistics. U.S. Department of Transportation, 2025.

Rahman, Ashrafur; Lownes, Nicholas E. Risk Assessment of Hazardous Materials Transportation Routes. University of Connecticut, 2013.

Synox. Securing the transport of hazardous materials with IoT: challenges and solutions. 2025.

Ellenex. Tank pressure and temperature monitoring: Embracing IoT sensors. 2023.

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe. Telematics Guidelines for the use of RID/ADR/ADN 5.4.0.2. 2024.

UNECE – United Nations Economic Commission for Europe. ADR 2025 – Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. 2024.

Yu, Shanchuan; Li, Yi; Xuan, Zhaoze; Li, Yishun; Li, Gang. Real-Time Risk Assessment for Road Transportation of Hazardous Materials Based on GRU-DNN with Multimodal Feature Embedding. Applied Sciences, 2022.