

**A CONTRIBUIÇÃO DA ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL DE OPERAÇÕES
LOGÍSTICAS COMO INSTRUMENTO DE PROTEÇÃO SOCIAL E
RESPONSABILIDADE SOCIOAMBIENTAL**

*THE CONTRIBUTION OF ENVIRONMENTAL RISK ANALYSIS OF LOGISTICS
OPERATIONS AS AN INSTRUMENT OF SOCIAL PROTECTION AND SOCIO-
ENVIRONMENTAL RESPONSIBILITY*

WILSON PIMENTA DA SILVA D'ÁVILA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO ESPÍRITO SANTO (IFES)

Nota de esclarecimento:

O X SINGEP e a 10ª Conferência Internacional do CIK (CYRUS Institute of Knowledge) foram realizados de forma remota, nos dias 26, 27 e 28 de outubro de 2022.



ANOS
SINGEP

A CONTRIBUIÇÃO DA ANÁLISE DE RISCO AMBIENTAL DE OPERAÇÕES LOGÍSTICAS COMO INSTRUMENTO DE PROTEÇÃO SOCIAL E RESPONSABILIDADE SOCIOAMBIENTAL

Objetivo do estudo

Proceder uma Análise de Risco Ambiental decorrente de vazamento de combustível seguido de incêndio proveniente de um caminhão-tanque em rodovia, em especial no que se refere à estimativa da magnitude dos fluxos térmicos gerados neste cenário acidental.

Relevância/originalidade

Certamente uma das palavras de ordem do momento chama-se sustentabilidade. Assim, a questão socioambiental é uma realidade não somente para o setor produtivo, mas também para o setor logístico, haja vista a importância que o modal rodoviário assumiu no território brasileiro.

Metodologia/abordagem

Foi realizada revisão bibliográfica para definir o modelo matemático a ser utilizado. O modelo proposto por Mudan (1984) foi escolhido para estimar a geometria das chamas, tal como diâmetro máximo da poça (D), comprimento da chama (H) e fluxos térmicos emitidos (q").

Principais resultados

Em áreas urbanas os fluxos térmicos podem alcançar instalações comerciais, residenciais, dentre outras. Embora existam limitações, a Análise de Risco Ambiental realizada permitiu demonstrar a importância desta ferramenta enquanto instrumento de proteção social e responsabilidade socioambiental.

Contribuições teóricas/metodológicas

Poucos trabalhos têm realizado Análises de Riscos Ambientais para o setor logístico, em especial no que se refere aos estudos de magnitude dos eventos decorrentes de incêndios em caminhões-tanques. Este trabalho auxilia no planejamento territorial e atendimento a emergência ambiental.

Contribuições sociais/para a gestão

Este trabalho constitui um avanço nos estudos sobre gestão dos impactos ambientais gerados pelos incêndios, haja vista que estes eventos são capazes de tirar vidas, paralisar atividades socioeconômicas e destruírem o patrimônio cultural, material e imaterial, constituído ao longo de gerações.

Palavras-chave: Meio ambiente, Sustentabilidade, Modelagem, Perigos, Incêndio

THE CONTRIBUTION OF ENVIRONMENTAL RISK ANALYSIS OF LOGISTICS OPERATIONS AS AN INSTRUMENT OF SOCIAL PROTECTION AND SOCIO-ENVIRONMENTAL RESPONSIBILITY

Study purpose

Carry out an Environmental Risk Analysis resulting from fuel leakage followed by fire from a tanker truck on the highway, especially with regard to estimating the magnitude of the thermal flows generated in this accidental scenario.

Relevance / originality

Certainly one of the watchwords of the moment is called sustainability. Thus, the socio-environmental issue is a reality not only for the productive sector, but also for the logistics sector, given the importance that the road modal has assumed in Brazilian territory.

Methodology / approach

A bibliographic review was performed to define the mathematical model to be used. The model proposed by Mudan (1984) was chosen to estimate the geometry of the flames, such as maximum pool diameter (D), flame length (H) and emitted heat fluxes (q").

Main results

In urban areas, thermal flows can reach commercial and residential facilities, among others. Although there are limitations, the Environmental Risk Analysis carried out made it possible to demonstrate the importance of this tool as an instrument of social protection and socio-environmental responsibility.

Theoretical / methodological contributions

Few studies have carried out Environmental Risk Analysis for the logistics sector, especially with regard to studies of the magnitude of events resulting from fires in tank trucks. This work assists in territorial planning and environmental emergency response.

Social / management contributions

This work constitutes an advance in studies on the management of environmental impacts generated by fires, given that these events are capable of taking lives, paralyzing socioeconomic activities and destroying cultural, material and immaterial heritage, constituted over generations.

Keywords: Environment, Sustainability, Modeling, Hazards, Fire

1 Introdução

Certamente uma das palavras de ordem do momento chama-se sustentabilidade. Ainda que esta palavra não represente algo novo para muitos negócios e operações das mais diversas organizações, durante muito tempo este conceito fez uma referência muito direta apenas ao pilar econômico, relegando, em maior ou menor grau, os aspectos sociais e ambientais. Todavia, a compreensão do conceito de sustentabilidade tem sofrido alterações, de modo que novos elementos vêm sendo incluídos ao longo das últimas décadas, em especial a responsabilidade social e ambiental (MORAES, G., 2009). Tal fato decorre de um processo de amadurecimento de diversos temas que, no Brasil, encontraram um ambiente mais favorável a partir da década de 1980, decorrentes de uma série de fatores internos e externos relacionados à política, sociedade e economia do país (DIAS; 2022).

No Brasil, segundo Horta Nogueira e Capaz (2010), a partir da Política Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 1981), da Resolução 001 do CONAMA (1986), bem como da tomada de consciência ambiental, em especial, após conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento (Rio 92), as organizações têm sido cobradas a demonstrarem um maior compromisso com os possíveis impactos socioambientais de seus negócios. Para o século XXI, diversos autores, tais como Valle e Lage (2004), Braga et al. (2005), Moraes, G. (2009), Seifert (2010), Horta Nogueira e Capaz (2014), dentre outros, têm apontado que tal compromisso está ligado à sobrevivência da organização.

Assim, a questão socioambiental é uma realidade não somente para empresas do setor produtivo, mas também para organizações do setor logístico, haja vista a importância que o modal de transporte rodoviário assumiu no território brasileiro. Tal importância deve-se a um conjunto de fatores – econômicos, geográficos, políticos e geopolíticos – que motivaram a prevalência do modal rodoviário em relação aos demais sistemas de transporte, datados em especial a partir da segunda metade do século XX. Além disso, as transformações ocorridas a partir da abertura econômica do país na década de 1990 e a intensificação do comércio internacional, associadas a outros fatores internos e externos, contribuíram para uma maior intensificação do fluxo de veículos pelas rodovias (CONTEL, 2020).

Neste contexto, intensificou-se também o transporte de combustíveis líquidos – e demais produtos químicos – pelas rodovias pavimentadas do país. Assim, diariamente, uma grande quantidade de caminhões-tanques trafega por diversos territórios com diferentes características topográficas, populacionais e ambientais, ou seja, territórios com diferentes potencialidades e fragilidades. Infelizmente, o fluxo destes produtos pelas rodovias, por vezes, resulta em eventos indesejáveis (acidentes) que podem gerar severos impactos ambientais, capazes de comprometer ecossistemas, bem como provocar sérias alterações nas atividades sociais, culturais e econômicas, além de fatalidades (VALLE; LAGE, 2004).

Nesta perspectiva, o setor logístico, onde encontram-se empresas responsáveis pelas operações de transporte de produtos perigosos – tais como os combustíveis líquidos – tem sido alvo de muitas regulamentações (BRASIL, 1988). Assim, cada vez mais, para manter a sustentabilidade de seus negócios, os operadores deste setor precisam estar preparados para as adversidades surgidas no desenvolvimento de seus processos (MORAES, G., 2009). Diante do exposto, torna-se necessário reconhecer, analisar e gerenciar os riscos decorrentes da atividade de transporte de produtos perigosos.

Diversos cenários podem surgir em caso de vazamento de produto perigoso e os cenários envolvendo incêndios constituem alguns dos mais temidos, haja vista que, por exemplo, a liberação de fluxos térmicos podem produzir diversos danos. Segundo National Fire Protection Association (2002), fluxos de $12,5 \text{ kW m}^{-2}$ podem gerar fusão de materiais plásticos, bem como podem produzir queimaduras de primeiro grau após 10 s de exposição. Zárate, Arnaldos e Casal

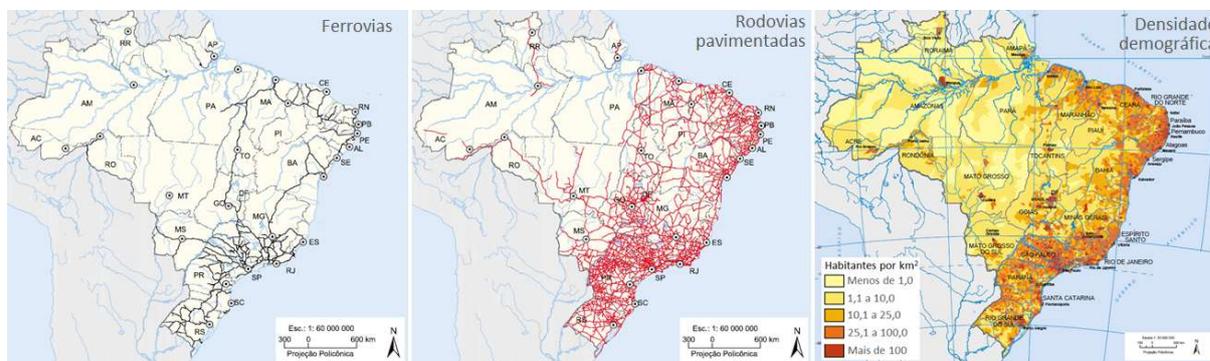
(2008) apontam que fluxos térmicos de $4,7 \text{ kW m}^{-2}$ são capazes de produzir sensação de dor para exposições de 15 s a 20 s.

Assim, tem-se que os riscos associados ao transporte de combustíveis líquidos precisam ser devidamente reconhecidos, estimados e analisados. Estudar estes eventos possibilita elevar o nível de segurança das operações de transporte, evitando prejuízos materiais, imateriais e outras consequências indesejáveis. Diante do exposto, este trabalho teve por objetivo proceder uma Análise de Risco de Ambiental de um cenário emergencial – hipotético – decorrente do vazamento de combustível líquido (gasolina) de um caminhão-tanque, em especial no que se refere à estimativa da magnitude dos fluxos térmicos gerados no cenário acidental a ser enfrentado pelas equipes envolvidas no controle da emergência ambiental.

2 Referencial Teórico

No Brasil, houve a preponderância do transporte rodoviário em detrimento de outros modais de transporte, desse modo, uma maior frequência de eventos indesejados envolvendo o transporte de produtos perigosos tem sido registrada nas rodovias (IBAMA, 2020). Uma análise geográfica da disposição do modal ferroviário (Figura 1A) e rodoviário (Figura 1B) no território brasileiro permite perceber, através da diferença de densidade das malhas, que os fluxos por rodovias tendem a ser mais intensos, haja vista que estas vias constituem a malha de circulação predominante no país. Igualmente, através da análise comparativa entre as Figura 1B e 1C é bem nítido que a maioria das rodovias pavimentadas se estabelecem sobre as áreas mais densamente povoadas do território brasileiro (IBGE, 2018).

Figura 1 – Malha ferroviária, rodoviária e densidade demográfica do território brasileiro



Fonte: IBGE (2018). Adaptado.

Assim, no Brasil, por predominar o transporte por rodovias, acidentes envolvendo o transporte com produtos perigosos não constituem preocupações de natureza eventual, mas sua frequência e potencialidade dos impactos os tornam muito relevantes para a sociedade e para as autoridades diretamente envolvidas nesta questão. Acidentes ambientais envolvendo produtos perigosos desencadeiam a necessidade de respostas muito rápidas, pois num curto intervalo de tempo podem evoluir para emergências ambientais. Segundo IBAMA (2020, p. 5), tem-se as seguintes conceituações:

Acidente ambiental: evento não planejado e indesejado que pode causar, direta ou indiretamente, danos ao meio ambiente e à saúde pública e prejuízos sociais e econômicos. **Emergência ambiental:** ameaça súbita ao bem-estar do meio ambiente ou à saúde pública em decorrência de falhas em sistema tecnológico/industrial, ou ainda, devido a um desastre natural, constituindo-se em situação de gravidade que obriga a adoção de medidas apropriadas (IBAMA; 2020, p. 5, grifo nosso).

A série histórica dos acidentes ambientais por tipologia registrados por IBAMA (2020) no período de 2017 a 2020 mostra que os acidentes em rodovias são os mais prevalentes - Figura 2. A análise desta série histórica permite verificar que no referido período de registro ocorreram 1523 acidentes ambientais em rodovias e 373 em ferrovias. Entretanto, cabe destacar que esta série histórica deve ser tomada apenas como uma amostra dos acontecimentos desencadeados no território brasileiro, haja vista que

é obrigatória a comunicação ao Ibama de acidentes ambientais ocorridos em empreendimentos licenciados pelo Órgão [IBAMA]. Entretanto, também **são registrados no Siema acidentes ambientais cujo licenciamento é de competência estadual e municipal, quando as informações das ocorrências são encaminhadas ao Ibama** pelas instituições responsáveis (IBAMA, 2020, p. 6, grifo nosso).

Figura 2 - Acidentes ambientais registrados por tipologia no Sistema Nacional de Emergências Ambientais – Siema.

Tipologia/Ano	2017	2018	2019	2020
Rodovia	315	374	321	243
Plataforma	184	268	194	172
Embarcações	49	42	87	95
Ferrovia	136	95	71	67
Dutos	43	44	59	56
Indústria	29	18	35	25
Terminais/portos e ancoradouros	35	31	22	20
Barragens	6	10	7	20
Posto de combustível	6	3	1	1
Refinaria	1	1	1	0
Armazenamento/depósito	5	3	1	2
Outros	103	154	119	79

Fonte: IBAMA (2020)

Acidentes rodoviários envolvendo o derramamento de produtos químicos constituem um problema muito diverso, haja vista às características de cada produto e seus possíveis impactos sobre o meio físico-natural, ecossistemas e características de ocupação das áreas circunvizinhas ao acidente. Contudo, em áreas urbanas tem-se que os danos podem ser mais acentuados, em especial sobre pessoas, haja vista a maior densidade populacional, de modo a aumentar o número de vítimas (D'ÁVILA, 2021). No caso das empresas logísticas que atuam no transporte de produtos perigosos, acidentes envolvendo o vazamento de produtos seguidos de incêndio na poça de combustível não são corriqueiros, porém estão no escopo dos possíveis cenários a serem enfrentados (D'ÁVILA; PEIXOTO, 2021).

Diante do exposto, considerando a diversidade de cenários emergenciais possíveis de surgir nas mais diversas situações operacionais e logísticas, D'Ávila e Campos (2020) chamam atenção para a necessidade de manter equipes preparadas para atuar em diversas situações de emergência e, para isso, os possíveis cenários emergenciais precisam ser bem conhecidos. A forma de se reconhecer os possíveis cenários acidentais, sejam eles relacionados aos incêndios, explosões ou outras ameaças, deve ser realizada através técnicas/procedimentos consolidados que compõem um plano maior: o gerenciamento de riscos. Neste sentido, ressalta-se que

Como vivemos num mundo de incertezas, a melhor forma de minimizar a possibilidade de insucesso é usar metodologias de planejamento, antecipação, identificação e controle dos riscos, de modo a tornar possível a implementação de medidas de controle consistentes, adequadas e eficazes de forma a minimizar a probabilidade de ocorrência de eventos indesejáveis (MORAES, G., 2009, p. 241).

Assim, Alvarenga e Almeida (2014), ao orientarem sobre os procedimentos de Avaliação de Impactos Ambientais, chamam atenção para a necessidade não somente da identificação dos impactos, mas também da realização de estudos que permitam a previsão de magnitude destes eventos. Nesta perspectiva, muitos trabalhos têm sido realizados com vistas a determinar a magnitude dos fluxos térmicos provenientes dos incêndios – ainda que com diferentes abordagens metodológicas e objetivos – haja vista a importância de conhecer melhor estes fenômenos e adotar as medidas preventivas necessárias à sua contenção, seja na etapa de projeto, seja no atendimento a emergência instaurada.

Santos e Landesmann (2013), por exemplo, desenvolveram estudos para verificar o comportamento de estruturas de tanques de armazenamento de combustíveis de concreto armado expostas a incêndio; Miao et al. (2014) realizaram simulação das consequências de um acidente proveniente de um incêndio em poça; Labovská e Labovský (2016) realizaram estimativas de fluxos térmicos sobre um corpo receptor; D'Ávila (2021) realizou estudo sobre a magnitude de fluxos térmicos emitidos em um cenário de incêndio em um posto revendedor de combustíveis; D'Ávila, Matos e Campos (2022) sistematizaram um processo metodológico para facilitar a estimativa dos fluxos térmicos a partir de modelos matemáticos já consolidados na literatura técnica da área segurança contra incêndio, dentre outros.

Os estudos acima citados, de modo direto ou indireto, refletem as preocupações das universidades, institutos de ensino e pesquisa, bem como das organizações em evitar certos erros – acidentes industriais/ambientais – que, num passado recente, causaram sérios prejuízos à sociedade, ao meio ambiente e às organizações (VALLE; LAGE, 2004). Assim, em especial a partir do final do século XX e início do século XXI, cada vez mais, muitas empresas têm assumido suas responsabilidades para além do processo produtivo, ou seja, é crescente o número de empresas que têm buscado assumir ou ampliar sua responsabilidade social que

engloba as responsabilidades de uma organização pelos impactos de suas decisões e atividades sobre a sociedade, o meio ambiente, a economia e, desse modo, apresenta a contribuição dessa organização para o desenvolvimento sustentável e para a sustentabilidade (ISO, 2014, apud BARBIERI; CAJAZEIRA, 2016, p. 114).

Neste contexto, as Análises de Riscos Ambientais constituem importantes ferramentas para que as empresas reconheçam os riscos de seus processos e, na medida em que estabelecem uma gestão (gerenciamento) destes riscos, fortaleçam a demonstração de sua responsabilidade socioambiental (MORAES. G., 2009). Desse modo, o gerenciamento de riscos contribui para redução do risco social, que se trata do “risco para um agrupamento de pessoas presente na vizinhança de um perigo, em período de tempo definido” (CETESB, 2011, p. 7).

Conforme discutido até aqui, tem-se que os acidentes ambientais podem se desdobrar na forma de poluição crônica ou aguda (DERISIO, 2012) e, no caso do setor logístico, acidentes envolvendo o transporte de produtos perigosos em caminhões-tanques podem acarretar ambos impactos e se transformarem em verdadeiras tragédias. Este tipo de evento – vazamento de produto em rodovia seguido de incêndio e/ou explosão – são caracterizados como acidentes tecnológicos (CETESB, 2011), podendo resultar em severos impactos negativos para as organizações, para o meio ambiente e para a sociedade. Assim, a adoção de mecanismos de previsão e controle destes eventos, com vistas a reforçar as ações de responsabilidade social corporativa é imperativa. Contudo, quanto à responsabilidade social, é preciso ficar claro que

Não se trata de filantropia empresarial, mas sim de um comprometimento das empresas de se comportarem de forma ética e de contribuírem para o desenvolvimento econômico com um aumento da qualidade de vida dos seus trabalhadores e familiares, bem como da comunidade local e da sociedade como um todo (MORAES, O. J., 2009, p. 56)

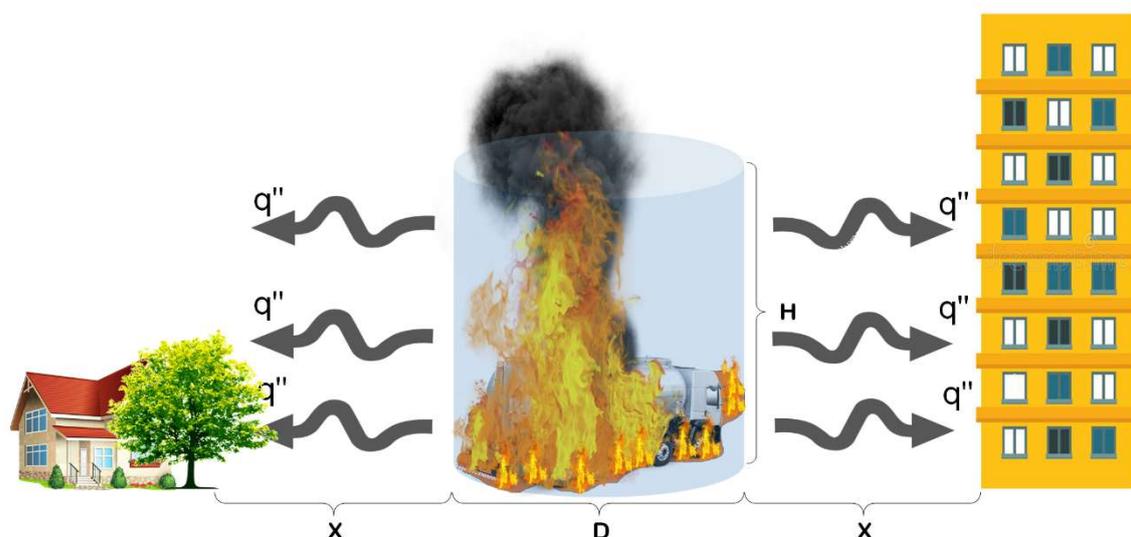
3 Metodologia

Para iniciar esta pesquisa, após definição do tema de interesse, uma revisão de literatura foi realizada com vistas a identificar as metodologias mais recentes que vêm sendo utilizadas para analisar e estimar a magnitude dos fluxos térmicos provenientes de incêndios em poça que, conforme Muñoz et al. (2007), é um dos cenários mais comuns dentre as diversas possibilidades de incêndios. Encerrada a revisão bibliográfica, um cenário emergencial hipotético, caracterizado pelo vazamento de combustível líquido de um caminhão-tanque em rodovia, foi definido para a iniciar a Análise de Risco Ambiental.

Considerando que um dos piores cenários decorrentes do evento definido corresponde ao vazamento de combustível seguido de incêndio em áreas densamente habitadas e ocupadas com estabelecimentos comerciais, o local escolhido para análise foi a Rodovia Carlos Lindenberg – e algumas de suas vias laterais – localizada no município de Vila Velha, Estado do Espírito Santo. Este local foi escolhido haja vista a existência de estudos anteriores realizados por D’Ávila (2021) e D’Ávila, Matos e Campos (2022) que fornecem um conjunto de parâmetros importantes e utilizáveis para outros estudos na região. A Rodovia Carlos Lindenberg é uma importante via de acesso ao município de Vila Velha, apesar de não ser a única. No trecho analisado, esta rodovia é composta por duas pistas de rolamento separadas por um canteiro central; cada pista contém três faixas e um acostamento.

A Análise de Risco Ambiental do cenário emergencial passa pela determinação de alguns parâmetros geométricos e térmicos do evento, haja vista a possibilidade deste tipo de análise ter o potencial para subsidiar ações de planejamento territorial e/ou de contenção de uma emergência ambiental. A Figura 3 apresenta os principais parâmetros a serem utilizados na Análise de Risco Ambiental, dentre eles, o diâmetro máximo da poça de combustível (D) em processo de queima; o comprimento da chama (H) e a distância (X) onde os fluxos térmicos (q'') projetados sobre um corpo receptor alcançam intensidades de $12,5 \text{ kW m}^{-2}$ e $4,7 \text{ kW m}^{-2}$.

Figura 3 – Principais parâmetros utilizados para Análise de Risco Ambiental



Fonte: Organizada pelo autor.

A estimativa dos fluxos térmicos foi realizada através do modelo proposto por Mudan (1984), haja vista que este, segundo National Fire Protection Association (2002), não apresenta limitações quanto à magnitude do fluxo térmico a ser estimado, podendo ser utilizado inclusive para estimar fluxos $\leq 5,0 \text{ kW m}^{-2}$. Assim, segundo o modelo Mudan (Equação 1), tem-se que

$$q'' = Eav \cdot Fw \cdot \tau_a \quad (1)$$

Onde: q'' (kW m^{-2}) é o fluxo térmico que atinge um objeto, Eav (kW m^{-2}) é a potência emissiva média na superfície da chama, Fw (adimensional) é o fator de vista e τ_a (adimensional) é a transmissividade atmosférica.

Para utilização do modelo Mudan, o ponto de partida é a determinação de alguns parâmetros geométricos, tais como diâmetro da poça (D). Para isso, considerando um fluxo contínuo de vazamento associado à queima do combustível, o diâmetro máximo da poça foi definido pela Equação 2, obtida a partir de Center for Chemical Process Safety (2003). Através da Equação 2, verifica-se que a poça é dependente da vazão do vazamento instaurado no tanque. Para analisar a dinâmica do cenário emergencial, foram realizadas simulações do diâmetro da poça para vazões de $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ a $0,06 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Esta faixa de vazões foi escolhida, pois foi considerada adequada ao estudo realizado. O combustível escolhido para análise foi a gasolina, haja vista a grande disponibilidade de informações sobre este produto. Assim, a densidade da gasolina (ρ) foi admitida como $= 740 \text{ kg m}^{-3}$ (PETROBRAS, 2020) e a taxa de queima (m'') $= 0,055 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, 2004).

$$D = \left(\frac{4V\rho}{\pi m''} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Onde: D (m) é diâmetro máximo da poça, V ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) é a vazão de liberação do combustível, ρ (kg m^{-3}) é a densidade do combustível e m'' ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é a taxa de queima do combustível.

A velocidade do vento no local (uw) foi utilizada para determinar a velocidade adimensional dos ventos (u^*) e posteriormente estimar o comprimento da chama (H). A relação entre uw , u^* e H encontra-se descrita através das Equações 3 e 4 (MUDAN,1984).

$$u^* = \frac{uw}{\left(\frac{g m'' D}{\rho v} \right)^{1/3}} \quad (3)$$

Onde: u^* é a velocidade adimensional dos ventos, uw (m s^{-1}) é velocidade do vento, g (m s^{-2}) é a aceleração da gravidade, m'' ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é a taxa de queima do combustível, D (m) é o diâmetro máximo da poça e ρv (kg m^{-3}) é a densidade de vapor do líquido.

$$\frac{H}{D} = 0,55 \left(\frac{m''}{\rho \alpha \sqrt{gD}} \right)^{0,67} u^{*-0,21} \quad (4)$$

Onde: H (m) é comprimento da chama, m'' ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é a taxa de queima do combustível, $\rho \alpha$ (kg m^{-3}) é a densidade do ar ambiente, g (m s^{-2}) é a aceleração da gravidade, D (m) é o diâmetro máximo da poça e u^* é velocidade adimensional dos ventos.

Para fins desta Análise de Risco Ambiental, a velocidade do vento (uw) foi definida em 0.9 m s^{-1} , pois resulta em uma velocidade adimensional dos ventos (u^*) menor do que 1. Nesta condição, conforme descrito por Mudan (1984), a posição da chama pode ser considerada como vertical. Esta opção foi feita haja vista os trabalhos desenvolvidos por D'Ávila (2021) e D'Ávila, Matos e Campos (2022) onde estes autores apontam que esta opção facilita a utilização do modelo Mudan, pois simplifica a metodologia de cálculo para obtenção do fator de vista (Fw). A densidade do ar ambiente ($\rho \alpha = 1,225 \text{ kg m}^{-3}$) foi admitida como sendo a Atmosfera Padrão Internacional, definida pela Agência Nacional de Aviação Civil (2020). A densidade de vapor (ρv) da gasolina foi obtida de Petrobras (2020), sendo esta densidade 3 a 4 vezes a densidade do ar, portanto, foi adotada como 3,5 vezes a densidade do ar ambiente ($\rho v = 4,288$).

Após esta etapa, foi determinada a potência emissiva média na superfície da chama (E_{av}), contudo, haja vista que durante um incêndio em poça, apenas parte da energia térmica gerada na combustão é transmitida ao corpo receptor por irradiação, foi necessária determinar a fração de calor irradiado (η). Nesse aspecto, utilizou-se os procedimentos propostos por D'Ávila, Matos e Campos que utilizaram uma média aritmética simples entre os resultados dos modelos propostos por McGrattan, Baum e Hamins (2000) e Muñoz et al. (2007), descritos respectivamente através das Equações 5 e 6, haja vista que poucos trabalhos têm sido desenvolvidos para determinar este fator (η).

$$\eta = 0,35 e^{-0,05D} \quad (5)$$

Onde: η (adimensional) é a fração de calor irradiado pela chama. D (m) é o diâmetro máximo da poça.

$$\eta = 0,436D^{-0,58}, \quad \forall D > 5 \text{ m} \quad (6)$$

Onde: η (adimensional) é a fração de calor irradiado pela chama, D (m) é o diâmetro máximo da poça.

Assim, a Equação 7 foi utilizada para determinação da potência emissiva média na superfície da chama (E_{av}). O parâmetro ΔH_c foi obtido de U.S. Nuclear Regulatory Commission (2004) e corresponde a 43700 kJ kg^{-1} .

$$E_{av} = \left(\frac{\eta \cdot m'' \cdot \Delta H_c}{(1+4H/D)} \right) \quad (7)$$

Onde: η (adimensional) é a fração de calor irradiado pela chama, m'' ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) é a taxa de queima do combustível, ΔH_c (kJ kg^{-1}) é o calor de combustão, H (m) é o comprimento da chama e D (m) é o diâmetro máximo da poça.

Vencida esta etapa, o fator de vista (F_w), que corresponde a razão entre o fluxo térmico recebido por um objeto e o emitido pela fonte, foi determinado, sendo este um fator dependente das dimensões da chama e da posição do corpo receptor em relação à fonte térmica (LABOVSKÁ; LABOVSKÝ, 2016). Considerando que a Equação 7 é um submodelo da Equação 1, bem como, a própria Equação 7 requer seus próprios parâmetros de entrada, as Equações 8, 9, 10, 11 e 12, foram utilizadas conforme procedimento descrito em Mudan (1984).

$$F_w = \sqrt{F_h^2 + F_v^2} \quad (8)$$

Onde: F_w (adimensional) é o fator de vista, F_h (adimensional) é o fator de vista horizontal e F_v (adimensional) é o fator de vista vertical.

$$A = \frac{h^2 + S^2 + 1}{2S} \quad (9)$$

Onde: A (adimensional) é parâmetro de entrada das equações 11 e 12, h (adimensional) é a razão entre o comprimento da chama (H) e o raio da poça (R), S (adimensional) é a razão entre a distância do alvo ao centro da poça (X_c) e o raio da poça (R).

$$B = \frac{1 + S^2}{2S} \quad (10)$$

Onde: B (adimensional) é parâmetro da equação 11, S (adimensional) é a razão entre a distância do alvo ao centro da poça (X_c) e o raio da poça (R).

$$F_h = \frac{1}{\pi} \left[\frac{(B-1/S)}{\sqrt{B^2-1}} \arctan \sqrt{\frac{(B+1)(S-1)}{(B-1)(S+1)}} - \frac{(A-1/S)}{\sqrt{A^2-1}} \arctan \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \right] \quad (11)$$

Onde: F_h (adimensional) é o fator de vista horizontal, A e B (adimensionais) são parâmetros de entrada. S (adimensional) é a razão entre a distância do alvo ao centro da poça (X_c) e o raio da poça (R).

$$F_v = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{S} \arctan \frac{h}{\sqrt{S^2-1}} + \frac{h}{S} \left(\arctan \sqrt{\frac{S-1}{S+1}} - \frac{A}{\sqrt{A^2-1}} \arctan \sqrt{\frac{(A+1)(S-1)}{(A-1)(S+1)}} \right) \right] \quad (12)$$

Onde: F_v (adimensional) é o fator de vista vertical, h (adimensional) é a razão entre o comprimento da chama (H) e o raio da poça (R), S (adimensional) é a razão entre a distância do alvo ao centro da poça (X_c) e o raio da poça (R). A é parâmetro de entrada.

Uma vez que E_{av} e F_w foram obtidos, seguiu-se a determinação da transmissividade atmosférica (τ_a), variável que indica quanto da energia emitida pela fonte de calor chega ao corpo receptor, após parte desta energia ter sido absorvida principalmente pelo vapor de água e pelo gás carbônico presente na atmosfera (LABOVSKÁ; LABOVSKÝ, 2016). Este parâmetro foi obtido através das Equações 13 e 14, descritas em National Fire Protection Association (2002) e Silveira (2018), respectivamente.

$$\tau_a = 2.02 (P_w \cdot X)^{-0.09} \quad (13)$$

Onde: τ_a (adimensional) é a transmissividade atmosférica, P_w (Pa) é a pressão parcial de vapor da água e X (m) é a distância entre a borda da poça e o corpo receptor.

$$P_w = U \cdot P_{vs} \quad (14)$$

Onde: P_w (Pa) é a pressão parcial de vapor da água, U (%) é a umidade relativa do ar (%) e P_{vs} (Pa) é pressão de vapor de água saturado.

Para utilização da Equação 14 a umidade relativa do ar (U) foi obtida através de dados meteorológicos da estação Vila Velha (Instituto Nacional de Meteorologia, 2020) e a pressão de vapor saturado (P_{vs}) foi obtida de Bóçon (2018). Assim, $U = 82,6\%$ e $P_{vs} = 3169$ Pa. Vencidas todas estas etapas de definição dos parâmetros necessários à modelagem, uma imagem aérea da Rodovia Carlos Lindemberg – e vias adjacentes – foi obtida através do Google Earth® (2022) e sobre esta imagem foram plotadas algumas possíveis posições do caminhão-tanque. Cada posição foi plotada como uma figura geométrica circular com três áreas sombreadas onde a área em azul corresponde à poça formada pelo derramamento, a área em vermelho corresponde à região onde os fluxos térmicos alcançam intensidades $\geq 12,5$ kW m⁻², e a faixa amarela corresponde à região em que os fluxos atingem intensidades $\geq 4,7$ kW m⁻². Assim, o limite exterior da faixa amarela corresponde a linha de isofluxo a partir da qual os fluxos térmicos tornam-se inferiores a 4,7 kW m⁻². Finalizadas estas etapas, os resultados foram organizados, analisados e discutidos.

4 Análise dos resultados

A definição de cenários hipotéticos para realização de uma Análise de Risco Ambiental é muito importante, pois é a partir deles que uma série de questionamentos vão sendo levantados, contudo é fundamental que os dados hipotéticos/estimados sejam cuidadosamente observados e, sempre que possível, comparados com cenários reais conhecidos por parte de alguns analistas que carregam certa experiência sobre o assunto. Neste caminho, o cenário acidental hipotético identificado e estudado nesta Análise de Risco Ambiental considerou um vazamento de combustível líquido – gasolina – numa pista de rolamento asfáltico, sendo seu espalhamento bidimensional e uniforme.

Contudo, haja vista as condições reais de limitações da pista de rolamento por canteiros e/ou calçadas (Figura 4A), tem-se que a formação da poça não será geometricamente circular (Figura 4B), pois irá apresentar-se mais alongada em torno de um determinado eixo que tende

a se aproximar do eixo longitudinal da via, ou seja, ter-se-á uma poça alongada, de geometria irregular, superando em um de seus eixos o diâmetro obtido na modelagem, bem como apresentará comportamento inverso no outro eixo, que se apresentará reduzido. De toda forma, nas condições modeladas e analisadas, um vazamento de gasolina com vazão de $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ seguido de incêndio apresentaria um diâmetro de 13,1 m e as chamas alcançariam 18,7 m de comprimento (Figura 4C). As figuras 4A, 4B e 4C representam esquematicamente a formação de uma poça de combustível seguida de incêndio – hipotético – que deve ser utilizada apenas para facilitar a compreensão e análise dos resultados que estão sendo apresentados e discutidos.

Figura 4 – Formação de um incêndio em poça (hipotético) no entorno de um caminhão-tanque



Fonte: Organizada pelo autor.

Além disso, na prática, o aumento do diâmetro da poça decorrente do aumento da vazão tende a encontrar outras interferências, pois em vias asfaltadas a declividade da pista poderá direcionar parte do fluido vazado para rede de drenagem pluvial, o que implica na redução do diâmetro da poça e, conseqüentemente, redução da altura da chama. Contudo, essa limitação tende a criar um outro cenário indesejável que é possibilidade de ter que lidar com um incêndio em galeria concomitantemente com o incêndio em poça. Para além do exposto, é preciso considerar que o direcionamento de resíduos de combustível para a rede pluvial poderá implicar na poluição da água em corpos hídricos distantes do local sinistrado. Assim, nota-se que, conforme aponta D'Ávila e Peixoto (2021), um cenário emergencial pode gerar outros.

Quanto à altura das chamas, embora a Figura esquemática 4C seja apenas hipotética, ela fornece uma informação muito importante quanto a um possível cenário a ser enfrentado pela equipe de emergência. Por limitações gráficas, a altura da chama na Figura 4C foi representada com o tamanho reduzido em relação à estimativa obtida através do modelo Mudan, contudo figuras e gráficos auxiliam na construção mental dos cenários facilitando a visualização de possíveis perigos e definição de estratégias de combate. Os resultados da modelagem apontaram que nas condições do Cenário 01, o comprimento da chama poderá atingir 18 m, o que

corresponde a um prédio de aproximadamente 6 andares, bem como considerando que as labaredas de um incêndio se movimentam aleatoriamente à medida que são empurradas pelo vento ou em decorrência dos processos convectivos atuantes na chama, ainda que o caminhão-tanque esteja localizado no meio da pista de rolamento, existe a possibilidade destas chamas atingirem diretamente algum edifício comercial e/ou residencial.

Outro agravante é que as chamas – considerando o movimento aleatório – também podem atingir a copa de algumas árvores localizadas no canteiro central ou próximas das pistas de rolamento. Tal fato poderia contribuir para propagar o incêndio, gerando o aparecimento de mais um cenário, diferente do inicial. Além disso, é importante considerar que nas áreas urbanas de muitos Estados brasileiros os condutores de energia elétrica são mantidos em suspensão, através de postes. Estes condutores podem vir a ser estruturalmente comprometidos.

Tal comprometimento se deve ao fato de que muitos condutores são confeccionados em alumínio e segundo a Associação Brasileira do Alumínio (2022), este material possui ponto de fusão de 660 °C. Assim, chama-se atenção para o fato de que labaredas de fogo podem apresentar temperaturas mais elevadas do que a temperatura de fusão do alumínio, resultando no comprometimento estrutural de certos condutores durante incêndios em rodovias, pois, segundo Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal (2019, p. 29), “o alumínio raramente resiste a um incêndio sem mudar seu estado físico, pelo fato de um incêndio poder atingir temperatura de 900 °C na fase desenvolvida.”

Segundo os resultados da modelagem, o comprimento das chamas pode se tornar mais acentuado e agravar o acidente caso a vazão do líquido seja mais intensa, haja vista que a modelagem do incêndio demonstrou que o comprimento das chamas é uma variável dependente da área da poça e esta, por sua vez, é dependente da vazão. Assim, através da Tabela 1 é possível verificar que triplicando a vazão do Cenário 01 ($0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) o comprimento das chamas podem alcançar 28 m. A referida tabela foi elaborada para diversos cenários, contudo, quanto aos fluxos térmicos, optou-se por representar apenas as distâncias alcançadas pelos fluxos de $4,7 \text{ kW m}^{-2}$, haja vista que fluxos desta magnitude são suficientes para projetar impactos negativos sobre as comunidades circunvizinhas ao acidente, bem como, apresentam maior abrangência do que os fluxos de $12,5 \text{ kW m}^{-2}$.

Tabela 1 – Cenários de vazamento e distâncias alcançadas pelos fluxos de $4,7 \text{ kW m}^{-2}$

Cenário	Vazão (Q) ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Diâmetro (D) (m)	Comprimento (H) (m)	Distância (X) (m)
01	0,01	13,1	18,7	9,1
02	0,02	18,5	24,2	10,6
03	0,03	22,7	28,1	11,0
04	0,04	26,2	31,2	11,1
05	0,05	29,3	33,9	11,0
06	0,06	32,1	36,2	10,8

Fonte: Resultados da pesquisa. Organizada pelo autor.

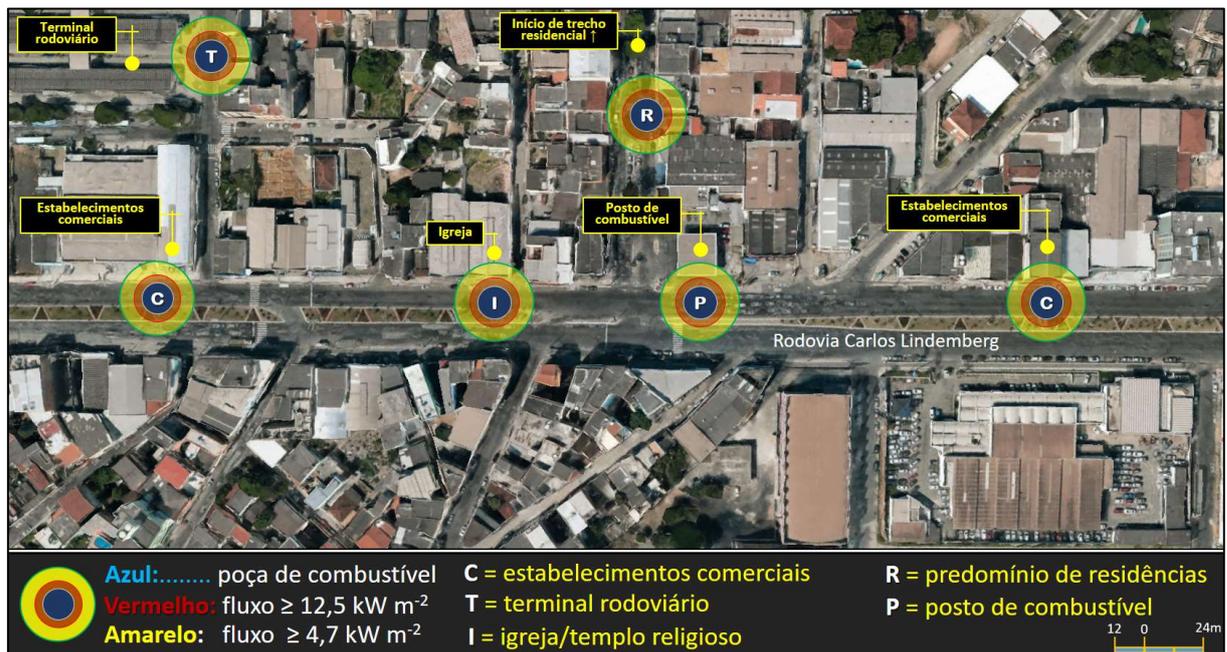
Numa situação real, caso o Cenário 01 não se modifique – o que é pouco provável – seria possível esperar que, conforme modelagem realizada, os fluxos térmicos produzidos por um derrame de $0,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ proporcionasse um fluxo térmico de $12,5 \text{ kW m}^{-2}$ a 3,4 m da borda da poça. Isso implica em considerar que a esta distância, segundo National Fire Protection Association (2002), estes fluxos poderiam gerar fusão de materiais plásticos, bem como produzir queimaduras de primeiro grau. Este nível de energia liberada é muito perigoso, visto que poderá gerar novos cenários de incêndio em estabelecimentos e/ou residências, localizadas

ou não no nível do solo, próximas do incêndio. Além disso, eleva-se o risco de incendiar outros veículos localizados nas proximidades da poça em chamas – ou dentro da poça – agravando ainda mais a situação de emergência.

Quanto aos fluxos de $4,7 \text{ kW m}^2$, embora bem inferiores aos de $12,5 \text{ kW m}^2$, é preciso considerar os riscos que eles representam, em especial caso haja uma exposição pessoal por mais de 15 s (ZÁRATE; ARNALDOS; CASAL, 2008). Embora em situações de emergência seja esperado que pessoas não fiquem voluntariamente expostas a fluxos desta intensidade, é preciso considerar que pessoas podem vir a ficarem paralisadas pelo pânico, podem ficar confinadas em determinados espaços, podem apresentar restrições de mobilidade (ARAUJO, 2008), bem como podem apresentar um comportamento adverso, aproximando-se ao invés de afastar-se, haja vista a curiosidade e o impulso por registrar acontecimentos incomuns.

Diante do exposto, torna-se muito evidente que linhas de isofluxo ou iso-risco obtidas através de modelagens podem auxiliar no planejamento territorial, na adoção de medidas de segurança estrutural, bem como na elaboração dos planos de emergência com vistas à redução de riscos à vida, à proteção ambiental e à preservação do patrimônio. Neste trabalho foram traçadas linhas de isofluxo para facilitar a visualização do Cenário 01. Diante da plotagem de alguns posicionamentos do caminhão-tanque nas vias, onde cenários de vazamento possam se desenvolver, nota-se que a mudança de posição poderá permitir que fluxos térmicos atinjam diferentes equipamentos e estruturas, inclusive gerando cenários mais severos – Figura 5.

Figura 5 – Posições do caminhão-tanque e possíveis estruturas atingidas



Fonte: Resultados da pesquisa. Organizada pelo autor.

Além disso, nota-se que em diversos locais as faixas com fluxos $\geq 12,5 \text{ kW m}^{-2}$ (vermelho) estão mais concentradas na pista de rolamento enquanto as faixas $\geq 4,7 \text{ kW m}^{-2}$ são mais abrangentes e com mais facilidade atingiriam estruturas comerciais, residenciais, dentre outras. Tais faixas, embora tenham sido grafadas como figura geométrica circular, em conformidade com demonstrações de cálculo realizadas por Center for Chemical Process Safety (2003), provavelmente irão adquirir, em algum dos lados da pista, um contorno retilíneo,

conforme demonstrado por D'Ávila (2021) ao plotar as linhas de isofluxo térmico para uma bacia de contenção, limitada por canaletas metálicas, em um posto revendedor de combustíveis.

Nas condições analisadas, considerando o trecho escolhido para realização da Análise de Risco Ambiental, verifica-se que, caso o caminhão-tanque saia da rodovia Carlos Lindemberg – caracterizada por três faixas e um acostamento – e adentre nas vias laterais que apresentam apenas uma faixa e um acostamento em cada pista de rolamento, os perigos gerados por fluxos $\geq 12,5 \text{ kW m}^{-2}$ e $\geq 4,7 \text{ kW m}^{-2}$ poderão, com maior facilidade, produzir impactos sobre as adjacências, em especial sobre residências e estabelecimentos com aglomeração de pessoas, tais como os terminais rodoviários e igrejas.

Assim, através desta Análise de Risco Ambiental, verifica-se que estudos desta natureza, embora hipotéticos e limitados, servem para auxiliar em diversos aspectos na tomada de importantes decisões. Primeiro, a nível macro ou regional, os estudos de magnitude de eventos/impactos permitem que os órgãos planejadores e reguladores da ocupação territorial consigam melhor disciplinar a localização dos postos de abastecimento, haja vista que, em áreas urbanas, estes são os principais destinos dos caminhões-tanques. Assim, preventivamente, a instalação de postos de abastecimento em locais onde as vias são demasiadamente estreitas poderia ser evitada, bem como, o posicionamento/localização de certos equipamentos urbanos concentradores de pessoas em certos locais também poderiam ser repensados.

Segundo, do ponto de vista do planejamento logístico do transporte do combustível líquido, tem-se que certos itinerários podem ou devem ser evitados. Embora, segundo Brasil (1988, s.p.) “o veículo que transportar produto perigoso deverá evitar o uso de vias em áreas densamente povoadas ou de proteção de mananciais, reservatórios de água ou reservas florestais e ecológicas, ou em que delas sejam próximas”, as Análises de Risco Ambiental, tal como a realizada nesta pesquisa, podem auxiliar na tomada de decisão quanto aos itinerários.

Um terceiro ponto de observação é o conhecimento sobre a magnitude dos cenários emergenciais a serem enfrentados. D'Ávila, Matos e Campos (2022) apontam a importância de reconhecimento destes cenários para que os enfrentamentos sejam mais assertivos. Nota-se que o enfrentamento não se constitui apenas em debelar o fogo, mas também em proteger as pessoas, o meio ambiente e o patrimônio por ventura ainda não atingidos pelo evento/desastre; bem como, trata-se de promover uma adequada preparação para acolhimento das populações já atingidas. Estas ações são tão importantes quanto a extinção do sinistro (incêndio), haja vista que seus efeitos se prolongam no pós-acidente. Contudo, embora os modelos matemáticos permitam estimar a magnitude dos efeitos físicos (CETESB, 2011), a real magnitude dos efeitos de um acidente ambiental estão muito além daquilo que tais modelos podem revelar.

O assunto aqui abordado é complexo e a utilização de modelos sempre implica numa série de incertezas (BRAGA; et al., 2005). Face ao exposto, por exemplo, National Fire Protection Association (2002) recomenda que para o modelo Mudan seja utilizado um fator de segurança (F_s), onde $F_s = 2$, ou seja, neste caso, os alcances das linhas de fluxos definidas aqui nesta pesquisa, em situações de projeto real, deveriam ser muito mais abrangentes do que aqueles apresentados na Figura 5. Além disso, conforme foi mostrado no decorrer da apresentação dos resultados e apontado por D'Ávila e Peixoto (2021), o incêndio em poça não é o único cenário decorrente de vazamento de um combustível líquido. No caso de vazamento, por exemplo, o produto poderá evaporar sem ser imediatamente queimado e, posteriormente, os vapores em suspensão podem entrar em combustão provocando um incêndio em nuvem ou uma explosão em nuvem, surpreendendo pessoas que por ventura estiverem próximas do cenário emergencial.

Note-se que as discussões aqui realizadas concentraram-se em torno do cenário 01, contudo, infelizmente, cenários de vazamentos mais significativos tais como o Cenário 02, Cenário 03, etc. também podem se desenvolver. Desse modo, constata-se que os cenários não

são estáticos, pois podem evoluir de um cenário inicial controlável para um cenário mais ampliado, portanto, mais perigoso. Diante do exposto, infelizmente é inevitável deparar-se com as limitações dos modelos, pois os cenários reais são dinâmicos, envolvem estruturas diversas, territórios/ambientes igualmente diversos. Contudo, embora uma Análise de Risco Ambiental mais completa sobre os incêndios não seja possível de ser abordada em poucas páginas, o esforço pela previsão de magnitude dos impactos gerados, conforme orientado por (ALVARENGA; ALMEIDA, 2014), constituem um importante esforço no sentido de melhor conhecer os cenários acidentais e preparar-se para eles. Neste aspecto, tem-se que

No caso de cenário envolvendo incêndios, explosões e vazamentos de produtos químicos, **a não realização da modelagem (análise de vulnerabilidade) é um fator limitante para dimensionamento de recursos humanos e materiais** capazes de controlar e minimizar a gravidade dos eventos envolvidos. Quando isso ocorre, os recursos humanos e materiais se apresentam inadequados, **resultando na ineficácia dos planos de emergência/contingência** em controlar as situações adversas como elas se apresentam (MORAES, G; 2009, p. 285, grifo nosso).

Assim, CETESB (2011) demonstra que todo o processo de gerenciamento de riscos é um caminho a ser percorrido e com etapas bastantes complexas, contudo, a Análise de Riscos Ambientais, através dos estudos de magnitude de fluxos térmicos, é uma importante ferramenta para proteção social e ambiental. Nesta perspectiva, espera-se que este trabalho motive outros pesquisadores a avançarem nos estudos sobre os incêndios e seus impactos sobre o meio ambiente, haja vista que estes eventos são capazes de tirar vidas, paralisar atividades sociais e econômicas, provocar distúrbios na fauna, flora e na atmosfera, bem como apresentam elevado potencial para destruírem o patrimônio cultural, material e imaterial, constituído ao longo de gerações.

5 Conclusões/Considerações finais

O gerenciamento de riscos das atividades logísticas, em especial aquelas que relacionadas ao transporte de produtos perigosos, tais como de combustível líquido, é fundamental para proteção da sociedade e do meio ambiente. Atualmente, as organizações precisam utilizar ferramentas que as coloquem em patamares cada vez mais elevados de sustentabilidade. Para dar conta destas novas exigências, as Análises de Riscos Ambientais constituem importantes ferramentas; dentre estas, os estudos de magnitude dos efeitos físicos dos incêndios contribuem significativamente para que as organizações consigam controlar eventos externos a seus processos, bem como contribuem para que órgãos governamentais tenham melhores parâmetros para planejamento e gestão do território. Em virtude da complexidade do tema, a Análise de Risco Ambiental aqui desenvolvida apresenta algumas limitações, haja vista que esta necessitaria de uma abordagem mais aprofundada, sistêmica e interdisciplinar para dar conta de todos os aspectos/cenários relacionados ao tema. Embora existam limitações, a Análise de Risco Ambiental aqui realizada permitiu demonstrar a importância desta ferramenta enquanto instrumento de proteção social e sustentabilidade socioambiental.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). **International Standard Atmosphere**, 2020. Disponível em: <<https://www2.anac.gov.br/anacpedia/sig/tr1105.htm>>. Acesso em: 20 ago. 2020.

- ALVARENGA, M.I.N.; ALMEIDA, M.R.R. Avaliação de impactos ambientais. In: HORTA NOGUEIRA, L. A.; CAPAZ, R. S. **Ciências ambientais para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap. 7, p. 193–220.
- ARAUJO, J.M.F. Comportamento humano em incêndios. In: Seito, A. I. et al. (Coord.). **A Segurança Contra Incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora. 2008. cap. 7, p. 93–100.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio: características físicas e químicas**. 2020. Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/caracteristicas-quimicas-e-fisicas/>>. Acesso em: 20 jul. 2022.
- BARBIERI, J.C.; CAJAZEIRA, J.E.R. **Responsabilidade social empresarial e empresa sustentável: da teoria à prática**. 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2016. 256 p.
- BOÇÓN, F. T. **Propriedades da água saturada (líquido e vapor), entrada de temperaturas**, 2018. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC037/Prof_Bocon/Tabelas_Vapor/Saturacao_temperatura.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.
- BRAGA, B., HESPANHOL, I., CONEJO, J.G.L., MIERZWA, J.C., BARROS, M.T.L., SPENCER, M., PORTO, M., NUCCI, N., JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental: o desafio do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2005.
- BRASIL. **Decreto nº 96.044, de 18 de maio de 1988**. Aprova o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 19 mai. 1988. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/antigos/d96044.htm>. Acesso em: 20 jun. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 02 set. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. **Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities**. New York, New York, United States, 2003.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência**, 2011. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4.261-Risco-de-Acidente-de-Origem-Tecnológica-Método-para-decisão-e-termos-de-referência.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2022.
- CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). **Resolução Nº 001: critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente**. Brasília, 1986. Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0001-230186.PDF>>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- CONTEL, F.B. Os sistemas de movimento do território brasileiro. In: Santos, M; Silveira, M.L. (Coord.). **O Brasil: território e sociedade no início do século XXI**. 20. ed. Rio de Janeiro: Record. 2008. 357–372.
- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO DISTRITO FEDERAL. **Manual de perícia em incêndio e explosões: conhecimentos específicos**. Brasília: Corpo de Bombeiros Militar do Distrito Federal, 2019.

- D'ÁVILA, W.P.S.; CAMPOS, T.A.O. Sistemas integrados de gestão ambiental, segurança e saúde ocupacional: uma diretriz para implantação das brigadas de incêndio em plantas industriais. **Revista Gestão Industrial**, n. 16, p. 145–163, 2020.
- D'ÁVILA, W.P.S.; PEIXOTO, E.A.F. Prevenção de acidentes ambientais: um levantamento dos cenários emergenciais gerados por vazamento de combustível líquido, com vistas à elaboração de planos de atendimento à emergência ambiental em rodovias. In: 18^a Mostra de Pós-Graduação, Santo Amaro, 2021. **Anais**. Disponível em: <<https://unisa-site-cdn.s3.amazonaws.com/uploads/2021/12/AnaisIC.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2022.
- D'ÁVILA, W. P. S.; MATOS, L. F.; CAMPOS, T. A. O. Segurança de processos e prevenção de acidentes ambientais: uma introdução aos estudos de fluxos térmicos como ferramenta de gerenciamento de riscos. In: Adriano Mesquita Soares. (Org.). **Engenharia de Produção: novas pesquisas e tendências**. 3. ed. São Paulo: AYA, 2022. cap. 2, p. 20–36.
- D'ÁVILA, W. P.S. A contribuição dos estudos de fluxos térmicos como ferramenta para prevenção da poluição atmosférica na circunvizinhança de plantas com armazenamento de combustíveis líquidos. **Meio Ambiente (Brasil)**, v.3, n.2. p. 056–074, 2021.
- DERISIO, J.C. (2012). **Introdução ao controle de poluição ambiental**. 4. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 224 p.
- DIAS, R. **Gestão ambiental: responsabilidade social e sustentabilidade**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2022. 234 p.
- GOOGLE EARTH®. **Imagem aérea de um trecho da Rodovia Carlos Lindemberg – Vila Velha, Espírito Santo**. Disponível em: <<https://earth.google.com/web/@-20.34663504,-40.31688604,16.75543916a,250.85896872d,35y,142.85248126h,0t,0r>>. Acesso em 15 jun. 2022.
- HORTA NOGUEIRA, L. A.; CAPAZ, R. S. Sustentabilidade e engenharia In: _____. **Ciências ambientais para engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. cap. 1, 1–13.
- IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Relatório de acidentes ambientais 2020**. 2020. Disponível em <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/emergenciasambientais/relatorios/2022-02-08_Relatorio_de_Acidentes_Ambientais_2020_Ibama.pdf>. Acesso em 26 jul. 2022.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas geográfico escolar**. 8. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2018. 224 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Série histórica da estação meteorológica de Vila Velha (ES) no período de 01/10/2019 a 30/09/2020**. 2020. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/GraficosDiarios/A634>>. Acesso em: 10 out. 2020.
- LABOVSKÁ, Z.; LABOVSKÝ, J. Estimation of thermal effects on receptor from pool fires. **Acta Chimica Slovaca**. v.9, n. 2, p. 169- 179, 2016.
- MCGRATTAN, K.B.; BAUM, H.R.; HAMINS, A. **Thermal Radiation from Large Pool Fires**. 2000. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nistir6546.pdf>>. Acesso em 15 ago. 2020.
- MIAO, Z.; WHENHUA, S.; JI, W.; ZHEN, C. Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. **Procedia Engineering**, 2014, 84: 565–577.
- MORAES, G. **Elementos do Sistema de Gestão de SMSQRS – Segurança, Meio Ambiente, Saúde Ocupacional e Responsabilidade Ambiental: Teoria da Vulnerabilidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: GVC, 2009. 463 p.
- MORAES, O. J. **Economia ambiental: instrumentos econômicos para o desenvolvimento sustentável**. 4. ed. São Paulo: Centauro, 2009. 224 p.

- MUDAN, K.S. Thermal radiation hazards from hydrocarbon pool fires. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 10, n.1, p. 59–80, 1984.
- MUÑOZ, M., ARNALDOS, J. CASAL, J.; PLANAS, E. Analysis of the geometric and radiative characteristics of hydrocarbon pool fires. **Combustion and Flame** n.139, p. 263–277, 2004.
- MUÑOZ, M., PLANAS, E., FERRERO, F. & CASAL, J. (2007). Predicting the emissive power of hydrocarbon pool fires. **Journal of Hazardous Materials**, n. 144, p. 725–729, 2007.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Handbook of Fire Protection Engineering**. Quincy, Massachusetts, United States, 2002.
- PETROBRAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - FISPQ - Gasolina**. 2020.
- SANTOS, F.S.; LANDESMANN, A. Aplicação de modelo numérico para análise de estruturas de tanques de armazenamento de combustíveis em concreto armado expostas a incêndio. In: XXXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, 2013, Pirenópolis. **Anais**. Disponível em: <<http://www.swge.inf.br/sitecilamce2013/cd/PDFS/CILAMCE2013-0378.PDF>>. Acesso em: 12 dez. 2021.
- SEIFFERT, M.E.B. **Sistemas de gestão ambiental (ISSO 14001) e saúde e segurança ocupacional (OSHAS 18001): vantagens da implantação integrada**. 2.ed. São Paulo: Atlas, 2010. 201 p.
- SILVEIRA, F.L. **Umidade relativa, pressão de vapor e ponto de ebulição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Centro de Referência em Ensino de Física (CREF). 2018. Disponível em: <<https://cref.if.ufrgs.br/?contact-pergunta=umidade-relativa-pressao-de-vapor-e-ponto-de-ebulicao#:~:text=Desta%20forma%20a%20condi%C3%A7%C3%A3o%20de,defini%C3%A7%C3%A3o%20UR%3DPPV%2FPVS.>>>. Acesso em 20 dez. 2020.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission. **Fire Dynamics Tools (FDTs): Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program**. Washington, DC, United States, 2004.
- VALLE, C.E., LAGE, H. **Meio ambiente, acidentes, lições, soluções**. São Paulo: Senac, 2004.
- VAZ JÚNIOR, C. A. 2015. **Modelagem de incêndio em poça**. Disponível em: <<http://www.eq.ufrj.br/docentes/cavazjunior/pooli.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2022.
- ZÁRATE, L.; ARNALDOS, J.; CASAL, J. Establishing safety distances for wildland fires. **Fire Safety Journal**, n. 43, p. 565–575, 2008.