

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA HÍDRICA – MESTRADO
PROFISSIONAL**

**Vulnerabilidade Hídrica: Acidentes com Transporte Rodoviário de
Produtos Químicos Perigosos em Minas Gerais: Estudo de Caso BR381
trecho entre Cambuí e Estiva.**

Patrícia Silva

Itajubá, fevereiro de 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA HÍDRICA – MESTRADO
PROFISSIONAL**

Patrícia Silva

**Vulnerabilidade Hídrica: Acidentes com Transporte Rodoviário de
Produtos Químicos Perigosos em Minas Gerais: Estudo de Caso BR381
trecho entre Cambuí e Estiva.**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica.**

Área de Concentração: Gestão De Sistemas Hídricos

Orientadora: Profa. Dra. Ana Paula Moni Silva

**Fevereiro de 2022
Itajubá**

Agradecimentos

A Deus, por sempre me guiar.

A minha mãe e minha avó por sempre me apoiarem e serem minha inspiração.

Ao Bruno e Duda por estarem ao meu lado.

A minha amiga e orientadora Ana Moni, pela paciência e orientação.

A UNIFEI por ser sempre nossa casa.

Epígrafe

“Revelemo-nos mais por atos do que por palavras”

Theodomiro C.Santiago

Resumo

O grande fluxo nas rodovias de Minas Gerais de caminhões contendo produtos químicos perigosos, em especial combustíveis e conseqüentemente seus acidentes são responsáveis por grandes contaminações ambientais das áreas de entorno. As áreas que margeiam as rodovias geralmente possuem corpos d'água que são afetados pelo derramamento de combustíveis. A vulnerabilidade hídrica de trechos que possam ser acometidos por acidentes rodoviários é preocupante para comunidades locais e órgãos ambientais. O objetivo deste trabalho é fazer uma análise multicritério baseando-se em dados pré-existentes com informações de áreas com maior índice de ocorrências de acidentes associando características hidrográficas e topográficas regionais, geradas a partir de ferramentas de Sistema Informação Geográfica – SIG, e assim gerar um mapa de vulnerabilidade hídrica. O método multicritério adotado neste estudo é o *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Como estudo de caso foi escolhido o trecho entre Cambuí – MG e Estiva – MG, da rodovia BR381. Com a carta gerada, apontando os potenciais cursos d'água com alta vulnerabilidade de contaminação, espera-se que possam servir de base para tomada de ações assertivas durante intervenção de ocorrências de acidentes rodoviários envolvendo contaminação de recursos hídricos na região e a gestão de riscos.

Palavras-chave: Combustíveis, Impacto ambiental, SIG, AHP, Acidentes rodoviários.

Abstract

The large flow on the highways of Minas Gerais of trucks containing dangerous chemicals, especially fuels, and consequently their accidents are responsible for major environmental contamination of the surrounding areas. Areas bordering highways often have bodies of water that are affected by fuel spills. The water vulnerability of stretches that may be affected by road accidents is worrying for local communities and environmental agencies. The objective of this work is to carry out a multicriteria analysis based on pre-existing data with information from areas with the highest rate of accident occurrences, associating regional hydrographic and topographic characteristics, generated from Geographic Information System - GIS tools, and thus generating a water vulnerability map. The multicriteria method adopted in this study is the Analytic Hierarchy Process (AHP). As a case study, the stretch between Cambuí - MG and Estiva - MG, of the BR381 highway, was chosen. With the generated letter, pointing out the potential watercourses with high contamination vulnerability, it is expected that they can serve as a basis for taking assertive actions during the intervention of road accident occurrences involving contamination of water resources in the region and the risk management.

Keywords: fuel, environmental impact, GIS, road accidents.

Lista De Figuras

Figura 1 - Malha Rodoviária de Minas Gerais.....	12
Figura 2 - Componentes da Vulnerabilidade.....	14
Figura 3 - Fluxograma do Plano de Ação em Emergências.....	16
Figura 4 - Escoamento dos Hidrocarbonetos no Solo.....	19
Figura 5 – Imagem de Satélite.....	26
Figura 6 - Mapa de Kernel.....	28
Figura 7 - Mapa da Bacia Hidrográfica.....	29
Figura 8 - Mapa de Declividade.....	32
Figura 9 - Mapa de Uso e Ocupação do Solo.....	33
Figura 10 - Mapa do Curso de água.....	34
Figura 11a – Mapa resultante da Análise Multicritério.....	37
Figura 11 b – Mapa resultante da Análise Multicritério.....	38

Lista De Quadros

Quadro 1 - Objetivos e etapas metodológicas.....	24
--	----

Lista De Tabelas

Tabela 1. Escala numérica de Saaty.....	21
Tabela 2. Índice de Consistência Aleatória.....	22
Tabela 3. Declividades.....	31
Tabela 4. Cobertura do solo e peso.....	31
Tabela 5. Matriz de cálculos Multicritérios.....	35
Tabela 6. Cálculos vetoriais.....	35
Tabela 7. Índice de Consistência.....	36

Lista De Abreviaturas E Siglas

ABIQUIM	Associação Brasileira da Indústria Química
AHP	Analytic Hierarchy Process
ANTT	Agência Nacional de Transporte Terrestre
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis
IC	Índice de Consistência
ONU	Organização das Nações Unidas
PAE	Plano de Atendimento a Emergência
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
2.1. RODOVIAS DE MINAS GERAIS	11
2.2. A VULNERABILIDADE AMBIENTAL/HÍDRICA	13
2.3 PLANO NACIONAL DE PREVENÇÃO, PREPARAÇÃO E RESPOSTA RÁPIDA A EMERGÊNCIAS AMBIENTAIS COM PRODUTOS QUÍMICOS PERIGOSOS	15
2.4. REGULAMENTAÇÕES DE TRANSPORTE DE PRODUTOS PERIGOSOS	17
2.6 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	20
2.6.1. Cálculos do índice de consistência	22
2.6.2. Julgamento holístico	23
2.6.3. Análise de sensibilidade	23
3. METODOLOGIA	24
3.1. CARACTERIZAÇÃO METODOLÓGICA	24
3.2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	25
4. RESULTADOS	27
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma grande malha rodoviária, devido a sua característica rodoviária criada e desenvolvida, que atribui mais de 60% de todo o fluxo nacional as rodovias, contra 53% da Austrália, 50% da China, 43% da Rússia e 8% do Canadá. O modelo de desenvolvimento do plano de Estado do presidente Juscelino Kubitschek entre 1955 e 1960 fez com que o transporte rodoviário fosse o principal meio para a movimentação de bens e pessoas no território brasileiro. De acordo com dados do Banco Mundial (Banco Mundial, 2013 apud BBC, 2018), o Brasil é o país com maior concentração de transporte rodoviário de cargas e passageiros entre as principais economias do mundo. Como consequência, a frota brasileira em circulação atingiu a marca de 65,8 milhões de veículos, entre automóveis, comerciais leves, ônibus, caminhões e motocicletas (IBPT, 2018; MIRANDA et al., 2021).

O crescimento da economia impulsiona o consumo e esse por sua vez o crescimento industrial para atender os mercados e a forma mais usual do escoamento desses produtos é através do transporte rodoviário. A grande quantidade de veículos, estradas em má conservação e fatores humanos atrelada ao fluxo intenso nas rodovias é responsável pela grande ocorrência de acidentes. A malha rodoviária federal do Brasil possui atualmente extensão total de 75,8 mil km, dos quais 65,4 mil km correspondem a rodovias pavimentadas e 10,4 mil km correspondem a rodovias não pavimentadas (Caderno de Transportes, 2018).

Os acidentes rodoviários envolvendo veículos que transportam cargas/produtos perigosos são de grande relevância. Nestes, a intensidade de risco está associada à periculosidade do material transportado com potencial para causar simultaneamente múltiplos danos ao meio ambiente e à saúde dos seres humanos expostos (PIZZATO e-SANTOS, 2018).

A grande malha rodoviária brasileira faz com que haja um aumento da demanda por estudos ambientais direcionados a instalação e operação de rodovias, e com estes a necessidade do desenvolvimento de programas que lidem com a identificação e gestão de acidentes com cargas perigosas (SILVA et al., 2015). O transporte de produtos perigosos em sua maioria ocorre via rodovia, por causa da estrutura da matriz de transportes do país.

Em Minas Gerais não existe um mapa de vulnerabilidade hídrica para suporte diante de acidentes e sua elaboração seria possível através da geotecnologia, ou seja, conjuntos de técnicas e métodos científicos aplicados à análise, à exploração, ao estudo e à conservação dos recursos naturais, considerando diferentes escalas e a informação espacial, aplicada à análise de vulnerabilidade, mapeando as áreas e analisando os impactos. Seria muito útil um

mapeamento desses desastres e, agregado a isso o impacto desses eventos nos corpos hídricos. Pretende-se então gerar um mapa de vulnerabilidade hídrica de uma área com maior ocorrência de acidentes envolvendo cargas de produtos químicos para que esse possa ser utilizado de base nas tomadas de decisão pós ocorrências no local.

Este trabalho contém uma revisão bibliográfica onde serão apresentados tópicos das rodovias de Minas Gerais, descreve a vulnerabilidade ambiental e hídrica, o Plano de Atendimento a Emergência, as regulamentações de transporte de produtos químicos, a contaminação ambiental por hidrocarbonetos e a análise multicritério. Posteriormente é descrito a metodologia utilizada, os resultados obtidos e as considerações finais.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desse trabalho consiste em analisar a vulnerabilidade hídrica diante de acidentes com transporte rodoviários propondo uma metodologia baseada na análise multicritério, propondo uma metodologia utilizando ferramentas SIG. Foi escolhido um trecho crítico da BR381, umas das principais rodovias de Minas Gerais, para estudo de caso.

Os objetivos específicos são:

- Levantar trechos críticos de ocorrências de acidentes rodoviários;
- Gerar e analisar os mapas que caracterizam a região de interesse;
- Aplicar o método multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP);
- Gerar um mapa de vulnerabilidade hídrica para o trecho estudado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Rodovias de Minas Gerais

Minas Gerais tem a maior malha rodoviária do Brasil, equivalente a 16% de toda a malha viária existente no país, sendo o quarto maior estado do Brasil, com área superior a 586.000 km² e um volume de circulação de produtos perigosos que gira em torno de 4,7 mil toneladas anuais em suas estradas federais e estaduais, de acordo com dados da "Agenda Estratégica de Logística da Indústria Química" da ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM, 2018).

Essas rodovias são federais e estaduais. As rodovias federais interligam, geralmente, dois ou mais estados da Federação e são de responsabilidade do Governo Federal. A decisão de conceder sua exploração à iniciativa privada deve partir do Ministério da Infraestrutura, de acordo com planos e estudos desenvolvidos pelo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. As rodovias estaduais têm limites geográficos de um mesmo estado, sendo sua construção e conservação atribuição do Governo Estadual, que também decide sobre sua exploração pela iniciativa privada. Já os sistemas viários municipais podem incluir rodovias e vias expressas, pontes e túneis que interligam localidades dentro de um mesmo município (ALVES, 2020).

Minas Gerais é considerado um corredor de tráfego entre pólos industriais, especificamente entre o Pólo Petroquímico de Camaçari na Bahia e o estado de São Paulo, a topografia acidentada que favorece ao acidente, além do traçado das estradas (ABIQUIM, 2018). A Figura 1 apresenta as principais rodovias brasileiras que atravessam o estado.

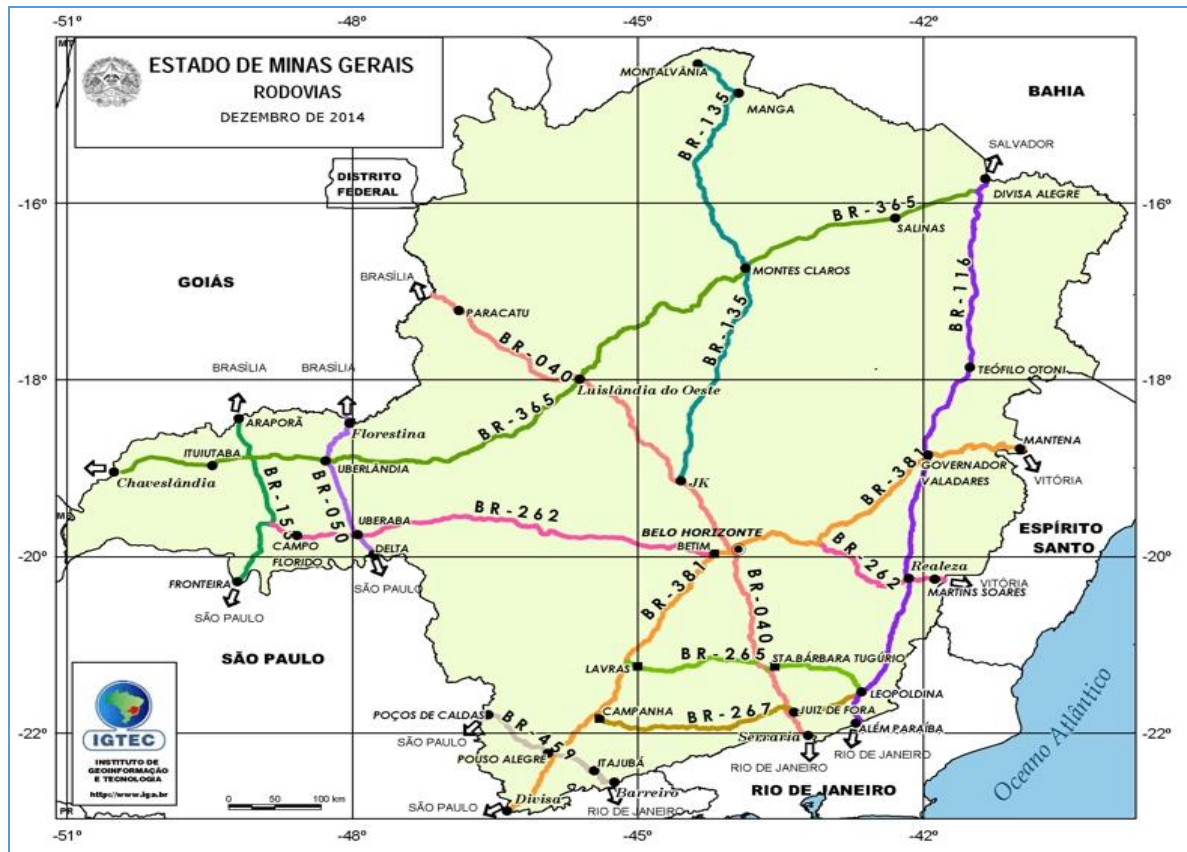


Figura 1 - Malha Rodoviária de Minas Gerais (2018)

Fonte: <https://www.mg.gov.br/conheca-minas/rodovias>

Os principais produtos perigosos envolvidos em ocorrências em Minas Gerais são combustíveis. Estes são todas as substâncias químicas que, ao reagirem com o oxigênio (O₂), sofrem um fenômeno químico denominado de combustão, liberando certa quantidade de energia na forma de calor (MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS, 2018).

Entre os combustíveis mais comuns transportados nas rodovias são: gasolina, óleo diesel, etanol, metanol, querosene, gás natural e gás liquefeito de petróleo. Os acidentes geram prejuízo ambiental e comprometem a saúde pública, sendo essas fontes significativas de impactos ambientais, afetando ar, solo, água, fauna, flora e vida humana. Com relação a saúde humana, o transporte rodoviário é responsável por problemas respiratórios e cardíacos devido as emissões de gases, poluentes e materiais particulados diversos (PIZZATO e SANTOS, 2018).

2.2. A Vulnerabilidade Ambiental/Hídrica

O conceito de vulnerabilidade é delimitado por processos sociais dinâmicos e multigeracionais que envolvem pelo menos três dimensões: (i) exposição a trajetórias de riscos, (ii) capacidades internas e externas de reação e (iii) possibilidades de adaptação baseada tanto na intensidade do risco quanto na resiliência das pessoas (SHUMANN e MOURA, 2015).

O termo vulnerabilidade tem sido utilizado em estudos expressando várias dimensões de um conceito que é empregado em muitos campos de saber como as ciências da vida, as naturais e as sociais, em especial na área da geografia, demografia, economia, saúde e bioética.

A vulnerabilidade não é uma característica mensurável de um sistema, é um conceito que expressa uma complexa interação de diferentes fatores que determinam a suscetibilidade de um sistema aos impactos que estão susceptíveis. Não existe uma regra rígida que possa definir quais fatores considerar, nem mesmo impor métodos usados para quantificá-los. Este é o motivo do qual se fala em "avaliar" em vez de "medir" a vulnerabilidade (VILLACRESES et al., 2021).

A diversidade de abordagens disciplinares e definição proporcionam uma ampla utilização do termo vulnerabilidade, que adquire delimitações específicas a depender da área em que é empregado, mas que corre o risco de perder significado pelo uso indiscriminado em amplo espectro de abordagens sem delimitação teórica e conceitual (SHUMANN e MOURA, 2015).

A Figura 2 mostra como a vulnerabilidade é decorrente de diversos fatores que se interagem.

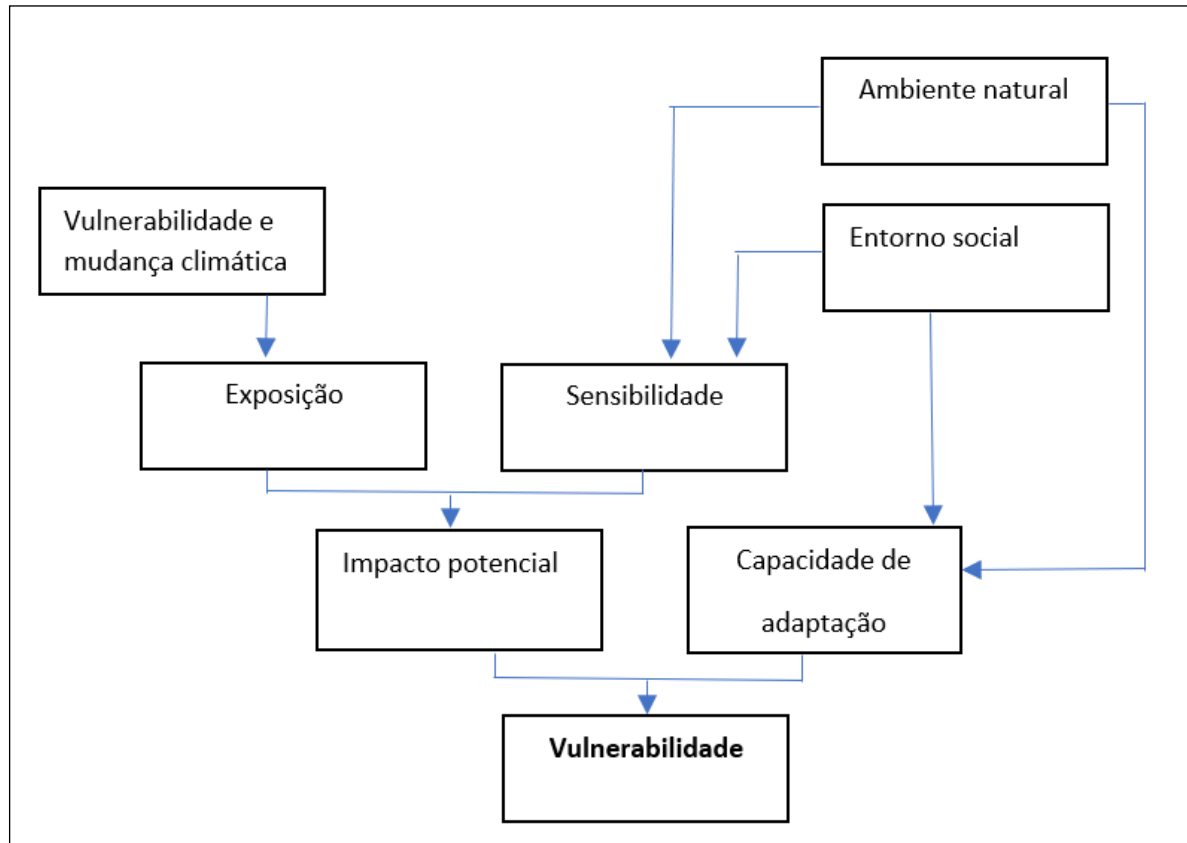


Figura 2 - Componentes da Vulnerabilidade
Fonte: Villacreses et al. (2021)

Sendo assim, a vulnerabilidade ambiental é uma perturbação sofrida pelo meio por diversos fatores e sua resposta depende de suas características naturais e humanas, ou seja, cada fração de território tem uma condição intrínseca que, em interação com o tipo e magnitude do evento que é induzido, resulta numa grandeza de efeitos adversos (SIQUEIRA, 2020).

A diferença no estudo de vulnerabilidade ambiental como um todo e a vulnerabilidade hídrica são os parâmetros que são considerados neste estudo.

A vulnerabilidade hídrica pode ser definida como a vulnerabilidade de uma região resultante da disponibilidade limitada de recursos hídricos e uso intensivo da água (PERVEEN e JAMES, 2011).

A avaliação da vulnerabilidade dos recursos hídricos tem como limitador a escolha de indicadores devido a quantidade e disponibilidade de dados e detalhes específicos da região em estudo (MOURA et al., 2020).

É crescente a preocupação da sociedade com o aumento da deterioração dos recursos hídricos. Diante deste cenário, o mapeamento de vulnerabilidade hídrica tem se apresentado como uma ferramenta eficiente para a gestão desses recursos (TERRA et al., 2013).

O estudo da vulnerabilidade na gestão dos recursos hídricos pode ser fundamental para os tomadores de decisão, pois permite avaliar a necessidade de implantação de gestão específica para preservar a qualidade ambiental, especialmente sobre as práticas de conservação do solo e águas nos diferentes níveis (graus) de vulnerabilidade. Ao observar e medir as relações entre as características de um meio, eventos induzidos e efeitos adversos, mede-se a vulnerabilidade ambiental de uma área (SIQUEIRA, 2020).

2.3 Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais com Produtos Químicos Perigosos

O Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais com Produtos Químicos Perigosos (P2R2) foi criado pelo Decreto do Presidente da República nº 5.098 de 2004 (BRASIL, 2004) com o objetivo de prevenir a ocorrência de acidentes com produtos químicos perigosos e aprimorar o sistema de preparação e resposta a emergências químicas no País. Para o que Plano seja desenvolvido é necessário sistema de informações de dados, mapeamento de áreas de risco, planos de ação de emergências e apoio financeiro (SOUZA et al., 2018).

Um Plano de Ações a Emergências ou Plano de Atendimento a Emergência – PAE fornece as diretrizes e dados para adoção de procedimentos capazes de mitigar os impactos ambientais e impactos na população. É obrigatório toda empresa de transporte rodoviário de produtos químicos e esse deve ser integrado com outros sistemas de resposta a emergência (SANTOS, 2018). O PAE é um instrumento simultaneamente preventivo e de gestão operacional, uma vez que ao identificar previamente os riscos, estabelece os meios para agir face à emergência. É um documento que obrigatoriamente deve tornar-se público aos participantes de todo o processo operacional e aos responsáveis pelas ações emergenciais na empresa e divulgado em todos os níveis funcionais para que, no momento de um acidente e situações de emergências, todos tenham conhecimento de suas ações e responsabilidades.

O PAE é parte integrante do programa de gerenciamento de riscos de empresas, de modo que as tipologias acidentais, os recursos e as ações necessárias para minimizar os impactos possam ser adequadamente dimensionadas, sua construção baseada em um desencadeamento lógico, conforme fluxograma a seguir, apresentado pela Figura 3:



Figura 3 - Fluxograma do Plano de Ação em Emergências.

Fonte: Malha rodoviária de Minas Gerais (2018)

O PAE tem como objetivo geral fornecer um conjunto de diretrizes, dados e informações com base em legislações, normas e boas práticas que forneçam as condições necessárias para a adoção de procedimentos técnicos e administrativos, de modo a proporcionar uma resposta rápida e eficiente em situações de emergências e de crise.

Para que seu objetivo geral seja realizável foram elencados os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e caracterizar a operação de armazenagem, manuseio e/ou transporte de produtos perigosos da empresa destinadora, transportadora e receptora a que este PAE se destina;
- Identificar e caracterizar a empresa responsável pela resposta no atendimento a emergência com produtos perigosos.
- Identificar as principais hipóteses acidentais de acordo com a operação da empresa a que este PAE se destina;
- Definir a estratégia de acionamento do PAE;
- Identificar as instituições governamentais de apoio em situações de emergência;
- Identificar os recursos para atendimento à emergência e os recursos de apoio disponíveis na área de operação da empresa a que este PAE se destina;
- Caracterizar as ações e os procedimentos de combate, em todas as suas fases, em situações de emergência, de acordo com os cenários acidentais previamente identificados;

- Caracterizar as ações e os procedimentos na fase pós-emergência;
- Preservar a integridade física das equipes de intervenção, da comunidade, do meio ambiente e do patrimônio e minimizar os impactos negativos decorrentes dos acidentes.

2.4. Regulamentações de Transporte de Produtos Perigosos

No Brasil a responsabilidade de regulamentar o transporte de produtos perigosos nas rodovias é a Agência Nacional de Transporte Terrestre – ANTT. Essa estabelece normas e padrões para que o transporte seja realizado com segurança. Utiliza instruções elaboradas pela Organização Mundial das Nações Unidas – ONU que abordam os pontos relacionados como embalagens dos produtos transportados, tipos de sinalizações, operações e limites de quantidades desses produtos (ANTT, 2011; ANTT, 2016)

A autorização para se transportar produtos perigosos é feita em âmbito Federal através de licenciamento conferido pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA, ou seja, todas as empresas transportadoras desses produtos são obrigadas a terem a autorização para poderem exercer a atividade de transportá-los, seja meio rodoviário, ferroviário ou aquaviário (SILVA, 2018).

O transporte rodoviário de produtos perigosos é de interesse em todas as esferas seja nacional, regional ou local, esse abrange desde fabricantes e transportadoras até organizações públicas e comunidades que poderão ser afetadas em caso de ocorrência de acidente com os mesmos. As consequências dos acidentes dependem das substâncias químicas envolvidas, quantidade transportada, meios de fuga, densidade da população de entorno e meio ambiente da região (HUGHES et al., 2015; SOUZA e MACHADO, 2019).

Em 2001, surgiu através da Associação Brasileira das Indústrias Químicas – ABIQUIM a SASSMAQ – Sistema de Avaliação e Saúde, Segurança, Meio Ambiente e Qualidade com objetivo de melhorar o desempenho operacional das transportadoras e reduzir os riscos durante operações de transporte e distribuição dos produtos perigosos (SOUZA e MACHADO, 2019).

Todo transporte de produto perigoso é realizado de acordo com legislações específicas e deverão ser classificados diante de seus riscos conforme Recomendações para o Transporte de Produtos Perigosos da ONU, o qual são subdivididos em nove classes: classe 1 – explosivos, classe 2 – gases, classe 3 – líquidos inflamáveis, classe 4 – sólidos inflamáveis, classe 5 – substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos, classe 6 – substâncias tóxicas e

substâncias infectantes, classe 7 – substâncias radioativas, classe 8 – substâncias corrosivas e classe 9 – substâncias perigosas diversas. A listagem da ONU contempla os produtos perigosos e esses são atualizados pela ABIQUIM (LIU et al., 2017; TAVEIRA et al., 2019).

2.5. Contaminação Ambiental por Hidrocarbonetos

Os combustíveis são compostos por misturas de hidrocarbonetos em sua constituição química, variando os átomos de Carbono provenientes do petróleo. Esses quando em contato com o solo, podem ser adsorvidos, transportados pelo vento ou pelas águas pluviais, lixiviados pelas águas de infiltração e/ou podem atingir as águas subterrâneas. O caminho que o contaminante irá percorrer depende da característica do solo local e sua declividade. Em solos impermeáveis, o contaminante irá movimentar-se de acordo com a declividade do terreno, podendo os cursos d'água, ou penetrar locais fraturados. Já em solos permeáveis, o contaminante irá em direção ao subsolo por gravidade e pelos processos de capilaridade (MARTINS, 2012).

A movimentação dos hidrocarbonetos em contato com o solo é caracterizada por formação de quatro fases que regulam os processos de migração do contaminante, são elas: fase líquida residual, fase líquida livre, fase dissolvida e fase vapor. A fase líquida residual caracteriza-se pelos resíduos líquidos relativamente imóveis que podem ser adsorvidos ou retidos entre os sólidos do solo. Já a fase líquida livre é quando o líquido livre não residual passa pelo solo. Na fase dissolvida os hidrocarbonetos dissolvidos podem estar presentes na superfície sólida do solo, formando películas ou na água do solo. A fase de vapor, os hidrocarbonetos em vaporização podem existir como componentes do vapor do solo ou se condensar e adsorver-se na superfície sólida ou dissolver-se na água do solo (GUIGUER, 1996).

O escoamento dos hidrocarbonetos em meio saturado é bifásico, sendo uma fase separada denominada “fase líquida não aquosa” ou NAPL (Non-Aqueous Phase Liquid), devido aos compostos orgânicos possuírem baixa miscibilidade em água. Já o escoamento em subsuperfície será influenciado pelo tipo de hidrocarboneto contaminante. Os NAPLs são subdivididos em LNAPL (Light Non-Aqueous Phase Liquids): líquido não aquoso menos denso do que a água, ou seja, mais leve que a água. Os hidrocarbonetos com essa característica estão comumente a gasolina, o óleo diesel e o querosene. E o DNAPL (Dense Non-Aqueous Phase Liquids), líquido não aquoso mais denso do que a água (FERREIRA, 2017).

A figura 4 abaixo é apresentado o comportamento do NAPL em diferentes fases presentes na superfície:

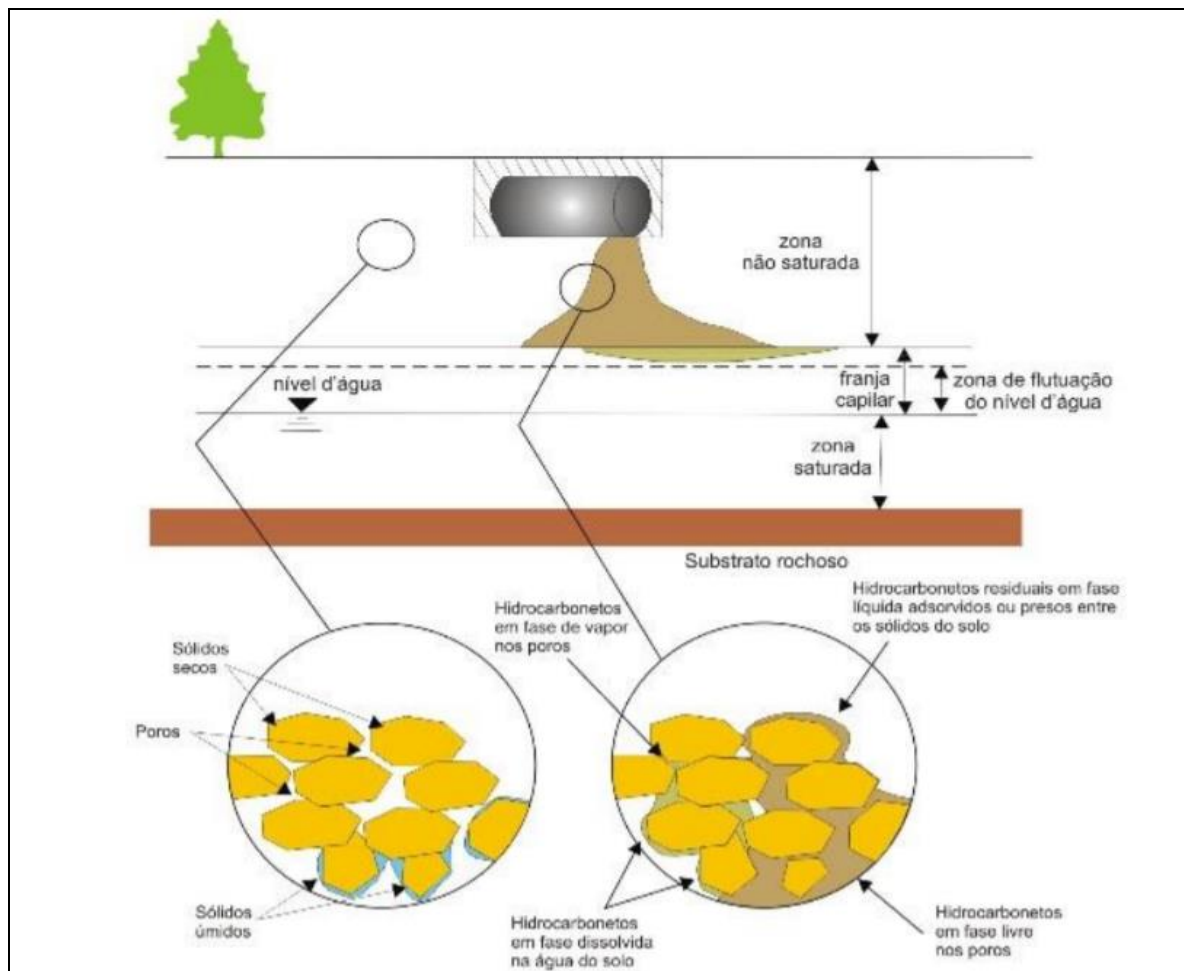


Figura 4 – Escoamento dos hidrocarbonetos no solo.

Fonte: Guiguer et al. (1996)

As ações emergenciais que são adotadas nos acidentes ambientais envolvendo hidrocarbonetos, bem como as ações pós-emergenciais, são medidas técnicas eficientes para eliminar ou diminuir os impactos gerados pela contaminação, as quais devem estar previamente determinadas em planos de intervenção. A responsabilidade pela realização das medidas necessárias à eliminação dos riscos é imputada ao agente causador da contaminação sob a orientação e coordenação do Órgão Ambiental e do Corpo de Bombeiros considerando-se os aspectos: porte do vazamento, produto vazado e características do cenário.

A remediação ou recuperação de uma determinada área contaminada pode-se dividir as medidas de remediação em dois tipos: medidas de contenção ou isolamento da contaminação e medidas para o tratamento dos meios contaminados visando a eliminação ou

redução dos níveis de contaminação a níveis aceitáveis ou previamente definidos. As principais técnicas utilizadas são: barreira hidráulica, biorremediação, escavação, remoção e destinação do solo, bombeamento e tratamento, extração multifásica, barreiras reativas permeáveis, estabilização e atenuação natural monitorada (FERREIRA, 2017).

2.6 Análise Multicritério

Os Métodos de Análise Multicritério (MAM) surgiram a partir de 1960 para avaliação de critérios representando atributos espaciais que possam garantir uma decisão mais adequada a realidade local. Como as vezes são levantados grande número de variáveis ou atributos é necessário critérios aos quais serão atribuídos pesos e valores, onde o maior peso e significância serão priorizados na tomada de decisão após as análises realizadas.

Existem vários tipos de Métodos de Análise Muticritério como: Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE); Método Combinação Linear Ponderada (CLP) (Weighted Linear Combination - WLC); o Média Ponderada Ordenada (MPO); a Agregação pelo Operador (Ordered Weighted Averaging - OWA); o Elimination and Choice Translating Algorithm (ELECTRE), e o mais conhecido, o método Processo Analítico Hierárquico (Analytic Hierarchy Process - AHP) (FIGUEIRA; GRECO; EHRGOTT, 2005). Esses métodos utilizam modelagem matemática realizando comparativo de alternativas ou cenários, buscando soluções mais adequadas para as tomadas de decisão (SILVA; BELDERRAIN, 2005).

Para resolução de problemas ou planejamentos ambientais que seja necessário análise espacial visando ao atendimento de um ou mais objetivos, geralmente é utilizado variáveis múltiplas usando ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), caracterizando análise multicritérios. O MAM integrado ao SIG fornece procedimentos de solução adequados para a seleção de locais para determinado fim, cuja seleção seja baseada em critérios de decisão complexos e informações espaciais, uma vez que essa seleção pode ser feita de forma mais abrangente com um conjunto de alternativas (PIMENTA, B. L., 2019).

Uma das formas que se pode estimar a vulnerabilidade hídrica diante de acidentes rodoviários em Minas Gerais é utilização do modelo decisão que consiste em multicritérios chamado *Analytic Hierarchy Process* (AHP). Esse método permite a hierarquização dos fatores relacionados a vulnerabilidade do meio de estudo.

Quando se fala em vulnerabilidade hídrica não existe só um parâmetro que pode ser atingido, portanto existe um conjunto de critérios que deverão ser avaliados. Os critérios são utilizados parâmetros para avaliação e comparação no cenário do modelo multicritério para que as melhores decisões sejam tomadas, mesmo sendo subjetivas para alguns casos (ENRÍQUEZ et al., 2021).

O método AHP como ferramenta consegue reunir as características do problema a ser estudado e resolvido, o contexto a ser trabalhado, a estrutura de preferência de quem irá avaliar e decidir, além do tipo de problemática. Portanto a ferramenta é capaz de consolidar diferentes naturezas, grandezas e dimensões, sendo possível múltiplas comparações quando o individual é desnecessário ou irrelevante.

É possível conseguir esses resultados através da ferramenta pois ela é baseada nas etapas do pensamento analítico que consistem em construção e definição das hierarquias, definição do que será prioritário no estudo e uma consciência lógica do que está sendo estudado. Através desses princípios torna-se uma ferramenta viável por possuir uma base matemática consistente.

Para desenvolver a modelagem de decisão multicritério AHP é necessário seguir os passos fundamentais: identificação do problema, definição das alternativas e implementar a melhor alternativa (SAATY, 1990).

Para comparar os critérios é necessário que pesos sejam atribuídos, de acordo com importância dada pelos decisores. Vários métodos são utilizados, sendo o mais comum a comparação realizada par a par chamada comparação paritária ou paritárias. É elaborada uma matriz para poder comparar os itens, podendo ser critérios definidos ou alternativas possíveis.

Existe uma escala denominada escala numérica de Saaty onde os pesos são justificados por aspectos psíquicos variando de 1 a 9, conforme tabela 1 Escala numérica de Saaty, a seguir.

Tabela 1. Escala numérica de Saaty

Escala numérica	Escala Verbal	Explicação
1	Ambos os elementos são de igual importância.	Ambos os elementos contribuem com a mesma propriedade de igual forma.
3	Moderada importância de um elemento sobre o outro.	A experiência e a opinião favorecem um elemento sobre o outro.
5	Forte importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é fortemente favorecido.
7	Importância muito forte de um elemento sobre o outro.	Um elemento é muito fortemente favorecido sobre o outro.
9	Extrema importância de um elemento sobre o outro.	Um elemento é favorecido pelo menos com uma ordem de magnitude de diferença.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários entre as opiniões	Usados como valores de consenso entre as

	adjacentes.	opiniões.
Incremento 0.1	Valores intermediários na graduação mais fina de 0.1.	Usados para graduações mais finas das opiniões.

Fonte: Abreu et al. (2019)

2.6.1. Cálculos do índice de consistência

Após montar a matriz é possível calcular o Índice de Consistência (IC) resultante dos julgamentos paritários, ele é dado pela divisão dos valores dos pesos sobre a soma de cada coluna, esse índice sendo proveniente dos julgamentos paritários.

Tendo os valores, posteriormente é necessário calcular o vetor de Eigen que irá determinar a contribuição de cada critério para atingir a meta organizacional, sendo este obtido pela média aritmética dos valores de cada um dos critérios. Assim, os valores representarão a participação de cada item, ou melhor, sua importância diante ao cenário.

Após calcular o vetor de Eigen correspondente ao estudo, é necessário calcular o número principal de Eigen que corresponde a somatória do produto de cada elemento do vetor de Eigen pelo valor total de cada coluna obtida na matriz de comparação paritária.

Tendo os valores calculados é possível obter o Índice de Consistência (IC), pela equação 1:

$$CI = (\lambda_{Max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

Em que:

λ_{Max} : número principal de Eigen;

n: número de critérios da matriz.

Ao encontrar o valor do Índice de Consistência será calculada a Taxa de Consistência (CR). A matriz será considerada consistente se a razão for menor que 10% (0,10), segundo Vargas (2010). Tem-se a seguinte equação 2:

$$CR = (CI/RI) < 0,1 \sim 10\% \quad (2)$$

Em que:

RI: Índice de Consistência Aleatória.

Onde o RI: Índice de Consistência Aleatória, encontra-se na tabela 2 abaixo:

Tabela 2. Índice de Consistência Aleatória

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
R1	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Abreu et al. (2019)

2.6.2. Julgamento holístico

Considera-se esse julgamento como sendo baseado na observação a partir do todo e deve-se considerar três passos:

- Atribuição de peso aos itens;
- Utilização de fórmulas para construção dos julgamentos da matriz de julgamentos paritários;
- Proceder às análises de consistência e verificação da melhor alternativa.

Tem-se a equação 3 de atribuição de julgamentos:

$$Se RJ > J \therefore (RJ - j) + 1 \tag{3}$$

$$Se RJ < J \therefore 1/[(j - RJ) + 1]$$

Onde:

Rj: referência de julgamento (elemento linha na matriz de comparação paritária).

J: julgamento (elemento coluna na matriz de comparação paritária).

O julgamento holístico deverá ser aplicado para cada alternativa existente e posteriormente analisar o CR para cada alternativa e ver se o valor é consistente. Com isso é possível inferir a hierarquização das ações e a vulnerabilidade.

2.6.3. Análise de sensibilidade

Consiste num tipo de análise para tomada da melhor decisão ou verificar quais dados devem ser trabalhados antes da decisão, concentrando nos elementos críticos. É realizada considerando a sensibilidade do valor da variável dependente, devido a mudança dos valores das variáveis independentes (ABREU et al., 2019).

No caso desse trabalho o curso d'água tem peso de importância maior durante uma comparação com os outros índices pois ele sofrerá a contaminação direta quando o produto químico derramado entrar em contato. Ao mesmo tempo a importância da declividade da área atingida e o uso e ocupação do solo deverá ser considerados fatores diretos.

3. METODOLOGIA

Esse capítulo mostrará os passos realizados desde o levantamento de dados, escolha de locais e aplicação de métodos para pontuação das características necessárias para medir a vulnerabilidade hídrica da área definida e geração de mapas.

3.1. Caracterização Metodológica

A metodologia proposta para mapear a vulnerabilidade hídrica no que se refere a ocorrência de acidentes rodoviários-deverá ser baseada na álgebra de mapas utilizando análise multicritério.

Para tanto deverá ser gerado um banco de dados geográfico contendo diversas informações, como traçado das rodovias, quantificação dos acidentes, uso e ocupação do solo, hidrografia, nascentes, entre outras, que poderão abastecer a matriz de avaliação.

A ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (SIG) adotada é o QGIS, sendo um programa livre e robusto, que possui as funcionalidades necessárias para o objetivo proposto.

As etapas metodológicas desse estudo estão no Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 - Objetivos e etapas metodológicas

Objetivos	Etapas	Técnicas
Definição da área de estudo	Levantamento de dados de acidentes; Levantamento da rodovia com maior ocorrência; Levantamento dos hot spots da rodovia; Levantamento dos produtos químicos mais recorrentes.	Revisão Bibliográfica
Definição dos cenários	Escolha da rodovia com maior índice de acidentes; Escolha da área dos hot spots.	Delimitação dos locais mais atingidos através de banco de dados.
Uso de ferramentas SIG	Informações geoespaciais. Informações de uso e ocupação de solos e cobertura vegetal. Cruzamento das informações acima.	Criação e álgebra de mapas.
AHP	Aplicação de modelagem de multicritérios AHP	Adoção, análises de pesos e resultados.
Proposta	Elaboração de mapas de vulnerabilidade hídrica.	Criação de mapas com resultado da AHP.

Fonte: A autora (2021)

3.2. Caracterização Da Área De Estudo

A área adotada para a elaboração deste mapeamento será o entorno da Fernão Dias em Minas Gerais, em função da disponibilidade dos dados sobre os acidentes envolvendo transporte de combustíveis e ser uma das principais rotas de combustíveis do Brasil. Serão usadas imagens do CBERS-4A, dados do IDE-SISEMA, do Alos. A Figura 4, apresenta uma imagem do Google Earth com o trecho da rodovia BR381, entre Cambuí e Estiva, conhecido pelo seu alto número de acidentes.

O trecho entre Cambuí e Estiva da BR381 apresenta uma geometria com curvas e declives favorecendo o risco de acidentes como tombamentos e saídas de pista.

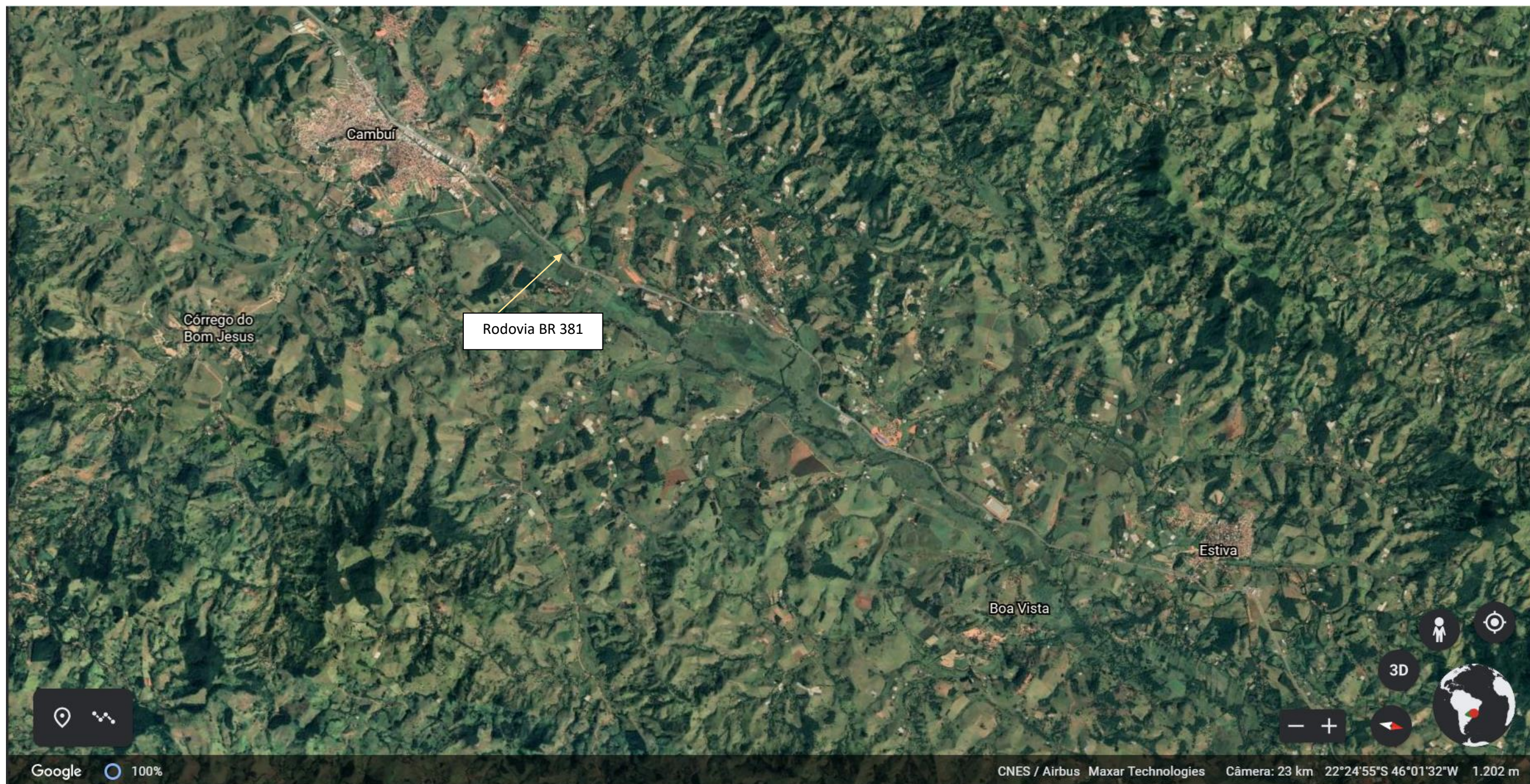


Figura 5 – Trecho da BR 381 e entorno.

Fonte: Imagem do Google Earth, data 05/05/2021.

4. RESULTADOS

Foi gerado o mapa de Kernel, ou seja, mapa de calor, com os pontos de maiores ocorrências de acidentes com produtos químicos (hot spots) na rodovia Fernão Dias, BR 381, no estado de Minas Gerais (Figura 6).

Para obtenção do mapa de calor foi utilizado dados de produtos químicos, malha viária - DNIT e base de dados de municípios e unidades da federação – IBGE 2019. O período de análise foi entre 01/01/2012 a 31/12/2017. Os dados de produtos químicos foram colocados em uma tabela do Excel e importados no QGIS no formato .csv.

Foi filtrado a BR 381 da base de dados do DNIT. O traçado da rodovia foi dividido por km pelo algoritmo *v.split* do GRASS (disponível no QGIS). A informação do número de acidentes por quilômetros foi inserida no *shaperfile* da BR 381 por meio de algoritmo *join attributes table* utilizando a coluna km como dado comum para a junção. Posteriormente foi criado um ponto médio em cada km (algoritmo *points along lines*) e realizado o mapa de calor pelo algoritmo *Heatmap (Kernel density estimation)*.

Como resultado, o mapa de calor apresentou que os trechos entre Cambuí e Estiva apresentam as maiores ocorrências de acidentes envolvendo veículos transportando produtos químicos.

A Figura 7 apresenta combinação do mapa de calor com a bacia hidrográfica localizada na região, onde se concentram as maiores ocorrências de acidentes com produtos químicos (hot spots) na rodovia Fernão Dias, BR 381, estado de Minas Gerais:

Para obtenção do mapa de bacia hidrográfica foi utilizado dados de Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos IDE – SISEMA e malha viária do DNIT. Utilizada a mesma metodologia descrita para obtenção do mapa de calor.

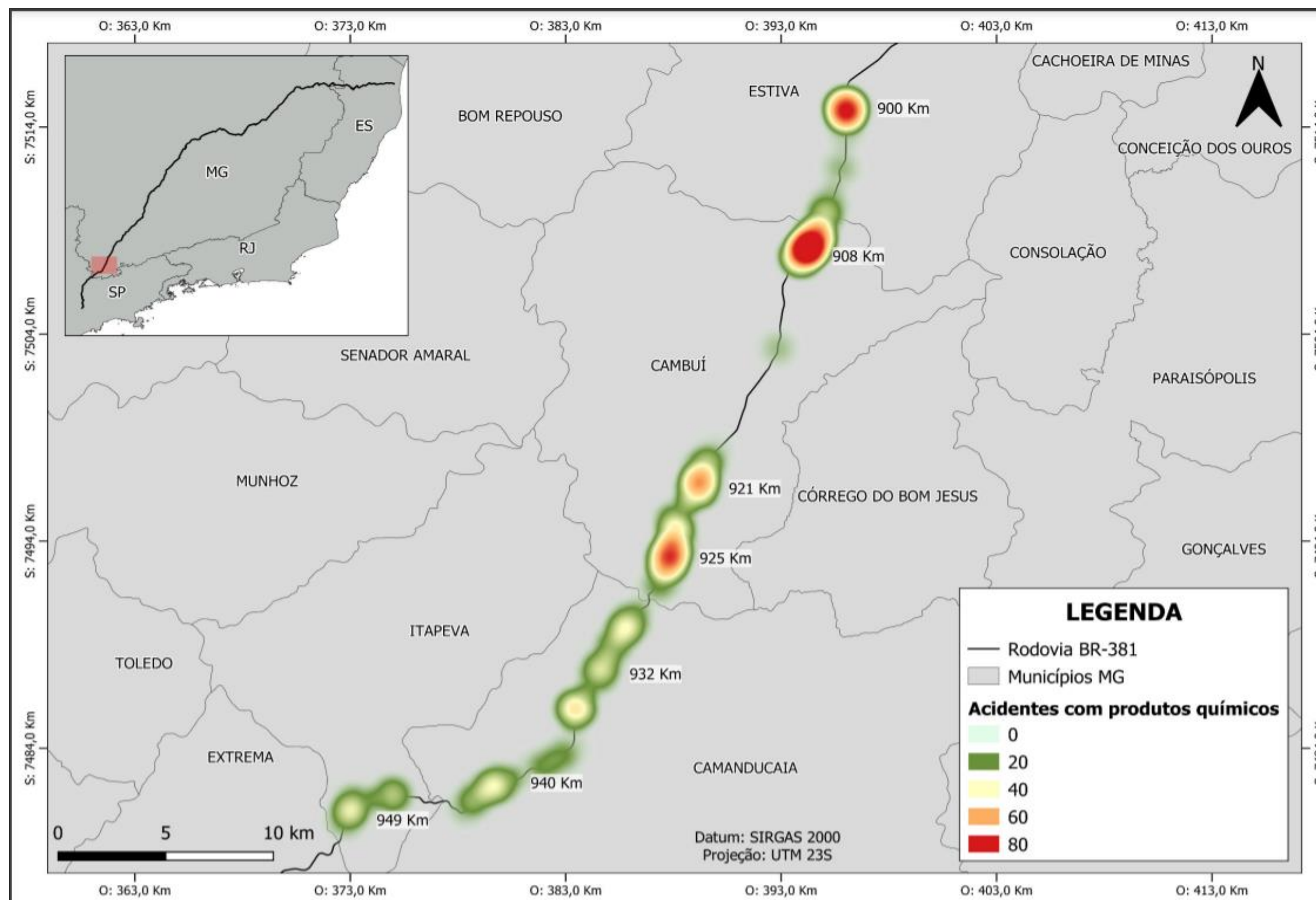


Figura 6. Mapa de Kernel

Fonte: Google mapas

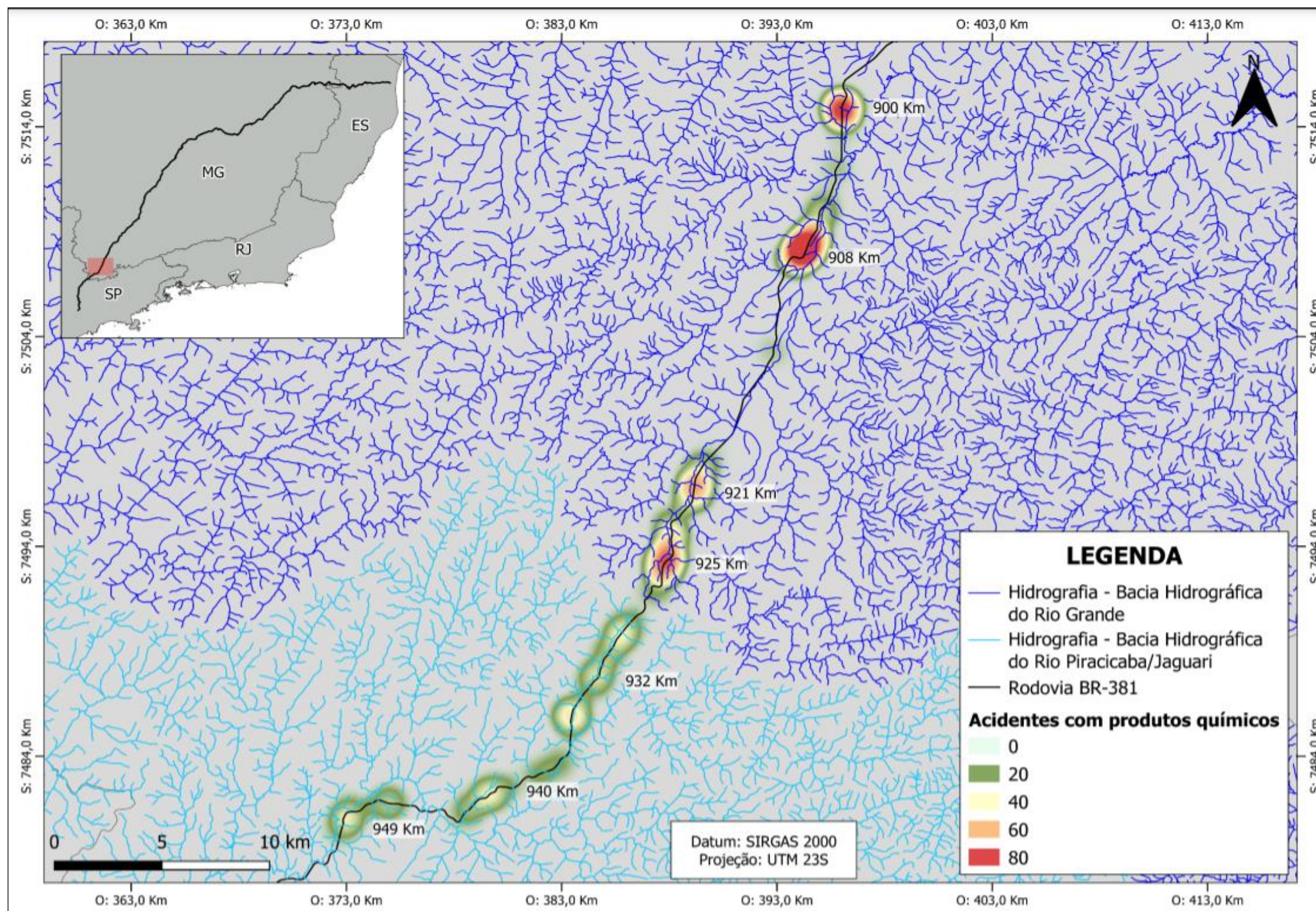


Figura 7. Mapa da bacia hidrográfica

Fonte: Google mapas

De acordo com a área de estudo, a BR381 trecho entre Cambuí e Estiva – MG, onde a primeira cidade possui uma população estimada em 30.068 habitantes e a segunda 11.416 habitantes (IBGE, 2021). Essas cidades possuem suas populações concentradas nas regiões centrais, porém nas imediações da rodovia BR381, existem plantações, pecuária, comércios, empresas e moradias.

Para este estudo foram escolhidos determinados parâmetros relevantes e passíveis de serem obtidos para se analisar a vulnerabilidade hídrica dos locais mais susceptíveis as ocorrências rodoviárias envolvendo produtos químicos: declividade do terreno, uso e ocupação do solo e hidrografia. Estes foram aplicados a análise multicritério, utilizando o método AHP, no qual pesos foram escolhidos de acordo com suas importâncias e impactos negativos causados dentro de cenários.

O uso de ocupação do solo nos trás o que seria atingido por esse derramamento de produto químicos. A declividade indica a direção para onde esse produto químico seguiria rota até encontrar um corpo d'água. Já o curso d'água permite identificar onde essa contaminação hídrica aconteceria e estaria mais vulnerável.

Através da manipulação do software QGIS 3.16.5 – Hannover, foi obtido o gráfico de Declividade da região estudada.

Para o mapa de declividade (Figura 08), foi coletado o MDE do satélite ALOS PALSAR disponibilizado pelo site EarthData, do ano de 2006, que em seguida recortou-se a camada para o perímetro de 500 metros da margem da BR381, no trecho que cobre as cidades de Cambuí e Estiva, em Minas Gerais. A partir dela, o comando de declividade foi empregado e utilizou-se a Reclassificação por Tabela, baseando nas categorias estabelecidas pela EMBRAPA, no livro Sistema Brasileiro de Classificação de Solos de 2018, com divisões de 1 a 6 e variações em porcentagem. Considerando a metodologia do AHP, é necessário a normalização da camada para valores entre 0 e 1, sendo executável pela Calculadora Raster, em que se aplica a seguinte equação 4:

$$\text{Normalização} = (\text{Declividade} - 1) / (6 - 1) \quad (4)$$

Dessa forma, o fator “Declividade” se torna apto ao encaixe do Multicritério. Tem-se a tabela 7 de declividades de acordo com o relevo:

Tabela 3. Declividades

Classe de Relevô	Declividade (%)
Plano	0 a 8
Suave Ondulado	3 a 8
Ondulado	8 a 20
Forte Ondulado	20 a 45
Montanhoso	45 a 75
Escarpado	>75

Fonte: EMBRAPA 2018

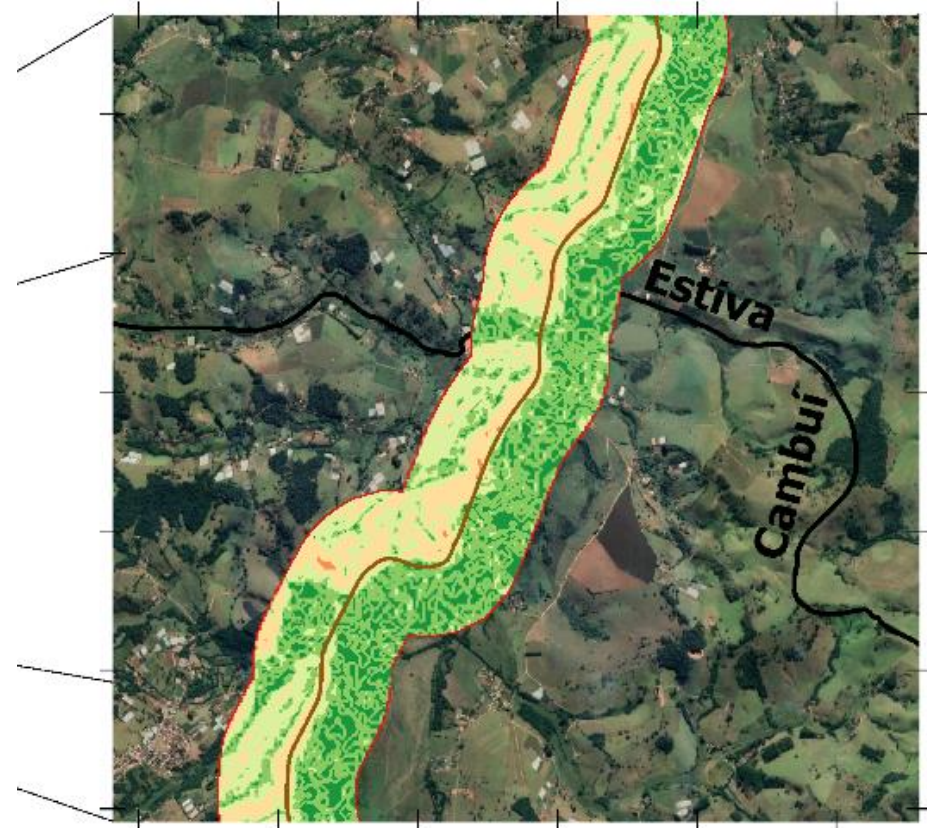
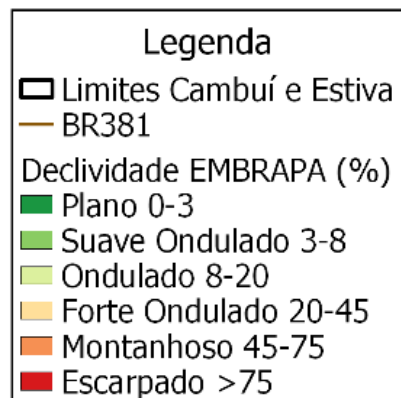
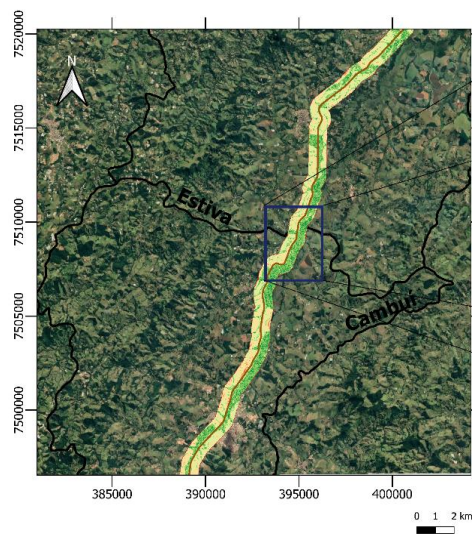
Posteriormente foi gerado o Mapa de Uso e Ocupação do Solo (Figura 09). O satélite CBERS4A fornece bandas com resolução de 8 metros, o que possibilita uma maior acurácia ao analisar o uso e ocupação do solo de qualquer região selecionada. Para esse estudo utilizou-se a mesma margem vista na confecção da Declividade, de 500 metros das laterais da BR381. Por meio da Classificação Supervisionada, enfoque no Maximum Likelihood, identificou-se 6 categorias de uso, e distribuiu-se os pesos arbitrários relacionados às suas importâncias para a leitura voltada a Vulnerabilidade Hídrica, como pode ser visto na Tabela a seguir:

Tabela 4. Cobertura do solo e pesos

Uso e Ocupação	Peso
Solo Exposto	0,45
Vegetação Rasteira	0,6
Vegetação Densa	0,35
Construção Civil	0,4
Área Urbana	0,3
BR381	0,8

Fonte: Autoria própria

O mapeamento dos cursos d'água do trecho analisado feito utilizando o catálogo de metadados da Agência Nacional de Águas (ANA), que está apresentado na figura 10. No detalhe da figura estão os nomeados os cursos d'água nos pontos críticos, os quais irão ser fundamentais na análise de vulnerabilidade.



Fonte: Imagem obtida pelo EarthData ALOS Palsar (Dezembro/2006)
 DATUM/Sistema de Projeção: SIRGAS2000/UTM zona 23S

0 0,5 1 km

Figura 8. Mapa da Declividade do Trecho da Área de Estudo

Fonte: Autoria própria

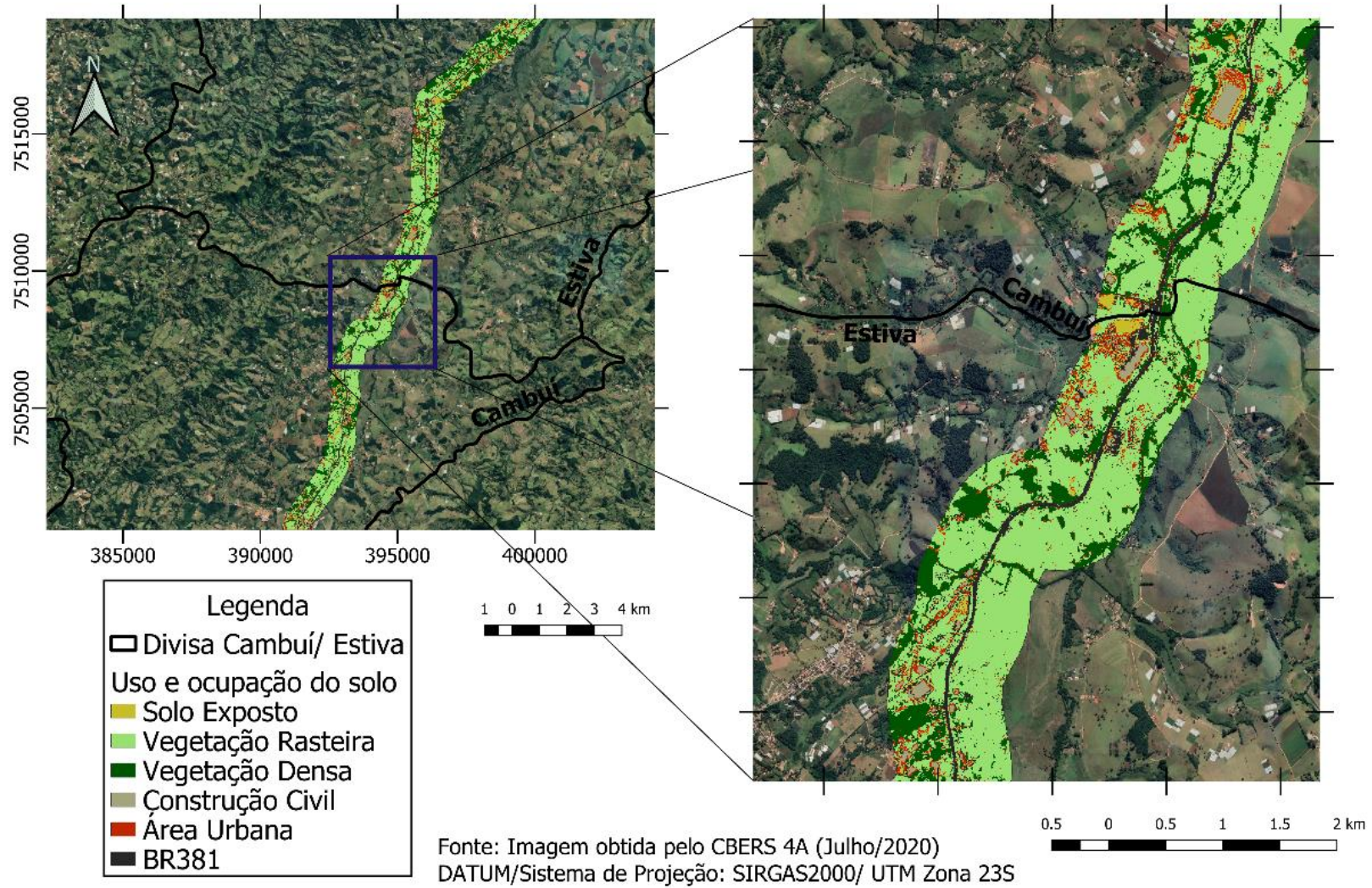


Figura 9. Mapa de Uso e Ocupação de solo do Trecho da Área de Estudo

Fonte: Autoria própria

Mapa Cursos d'água - BR381 trecho entre Cambuí e Estiva - MG

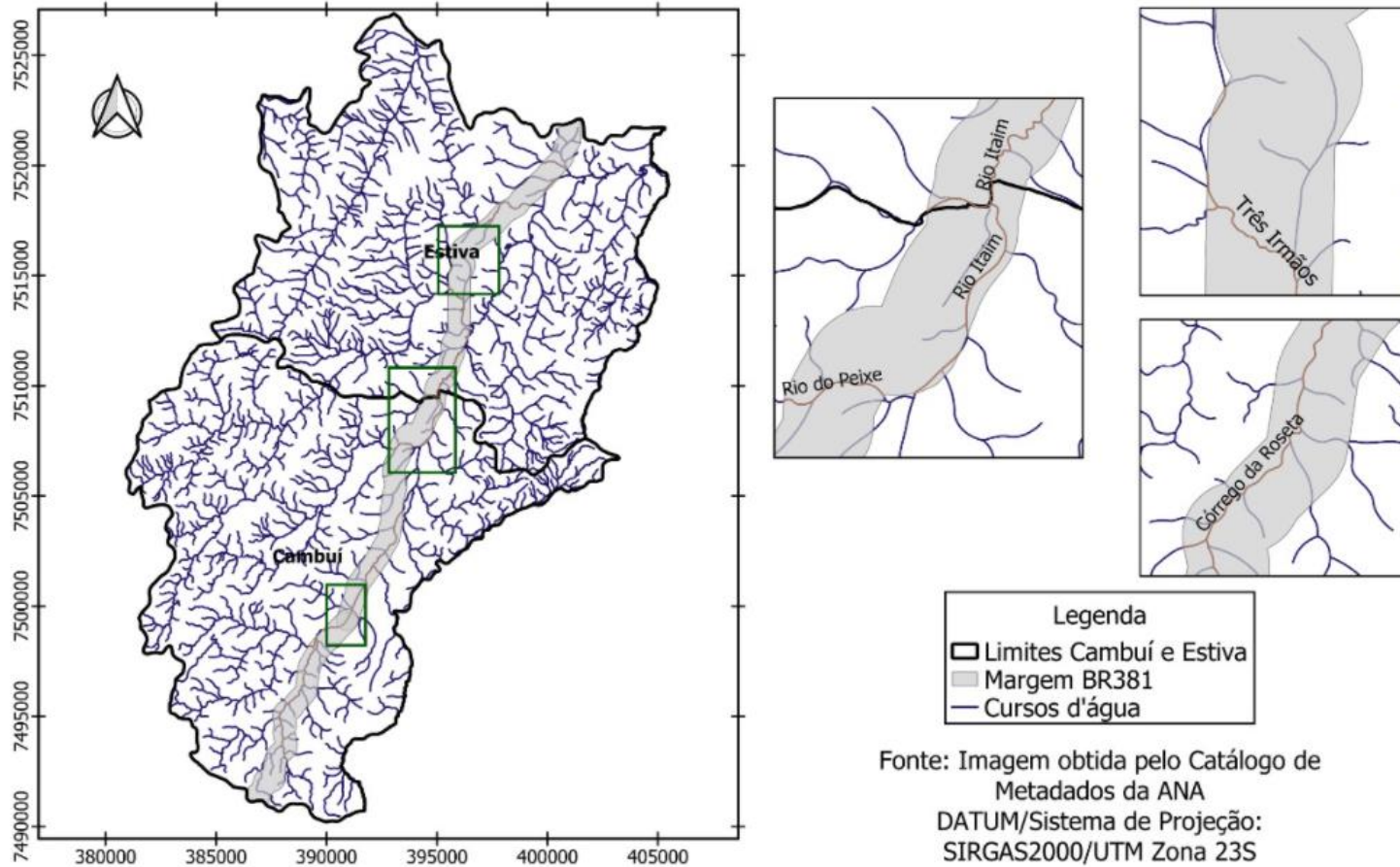


Figura 10. Mapa do Curso d'água do Trecho da Área de Estudo

Fonte: Autoria própria

No software QGIS, o complemento utilizado para tal manipulação é denominado “SCP”, em que se coleta manualmente amostras, em formas geométricas livres, de acordo com as categorias pré-determinadas pelo usuário. Para o resultado obtido nesse estudo foram coletadas aproximadamente 70 amostras totais de ocorrências rodoviárias em um período de cinco anos envolvendo produtos químicos, as quais são submetidas ao processamento do complemento que identifica os pixels selecionados para assemelhar à camada inteira mesclada das Bandas 1,2,3 e 4 do satélite. A apuração de saída está em Raster, necessitando a conversão para vetor em que se introduz dos pesos mencionados anteriormente à Tabela de Atributos, que após modificação retorna-se ao modelo Raster, estando apto ao encaixe do Multicritério sem normalização.

Para determinar os pesos utilizados realizou-se uma distribuição de acordo com o grau de importância de cada índice, comparado aos outros dois em uma Matriz 3x3. Portanto diante de uma ocorrência rodoviária com derramamento de produtos químicos:

- Primeira maior importância – Cursos d’água;
- Segunda maior importância – Declividade;
- Terceira maior importância – Uso e ocupação do Solo.

Aplicando o Método de Multicritérios, temos as tabelas a seguir:

Tabela 5. Matriz de cálculos Multicritérios

Índices	Uso e ocupação do solo	Declividade	Cursos d’água
Uso e ocupação do solo	1	3	5
Declividade	0,333	1	2
Curso d’água	0,2	0,5	1

Fonte: Autoria própria

Para obter os Autos vetores realizou-se a divisão da soma das linhas da Matriz pela somatória geral das linhas dessa matriz, conforme dados da tabela abaixo:

Tabela 6. Cálculos vetoriais

Soma Linhas	Auto vetor (W)	n	Produto vetorial (D*W)	Lambda (λ)	Lambda Máximo (Auto valor)
9,0	0,641	3	1,959	3,055	3,0049
3,33	0,237		0,693	2,920	
1,7	0,121		0,368	3,039	

Fonte: Autoria própria

Tabela 7. Índice de Consistência

IC	iR	RC
0,0025	0,89	0,0028

Fonte: Autoria própria

O resultado consta da interação dos três critérios através do cálculo de multicritério AHP, Equação (x), por conseguinte, aplica-se a Equação (xx) na Calculadora Raster:

$$S = \sum w_i \times x_i \quad (5)$$

Em que:

S = valor final do score;

w_i = peso do fator;

x_i = valor normalizado do fator.

Tal que se torna:

$$\begin{aligned} \text{Multicritério} = & (\text{Declividade} \times 0,24) + (\text{Uso e ocupação} \times 0,64) \\ & + (\text{Curso d'água} \times 0,12) \end{aligned} \quad (6)$$

A classificação no mapa que varia de “Baixa”, em verde, a “Alta”, em vermelho, se aplica em seus limites espaciais habilitando, dessa maneira, a interpretação da Vulnerabilidade Hídrica localmente nos corpos hídricos que percorrem a margem da BR381.

Análise Multicritério - BR381 trecho entre Cambuí e Estiva - MG

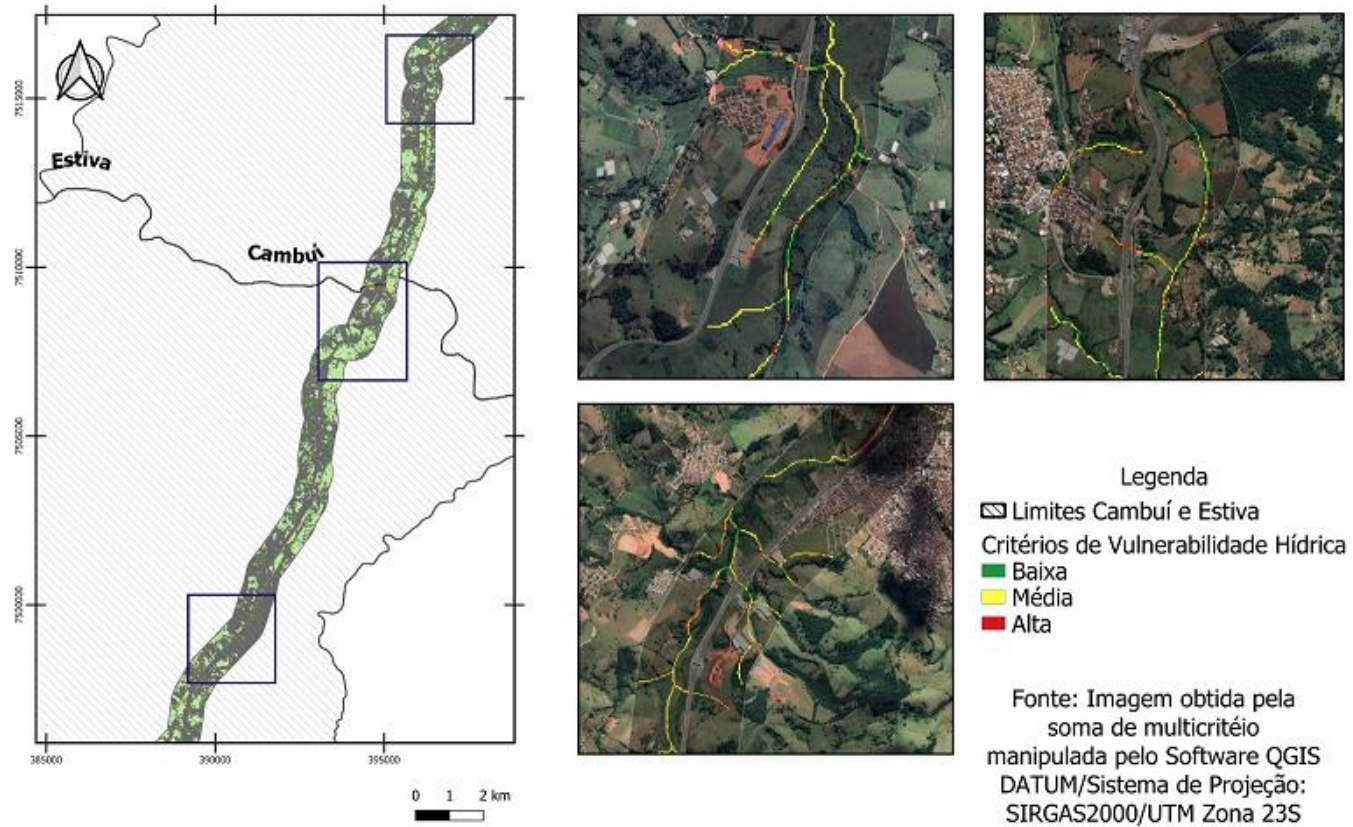


Figura 11 a – Mapa resultante da Análise Multicritério – Trecho Cambuí – Estiva, MG da BR381

Análise Multicritério - BR381 trecho entre Cambuí e Estiva - MG

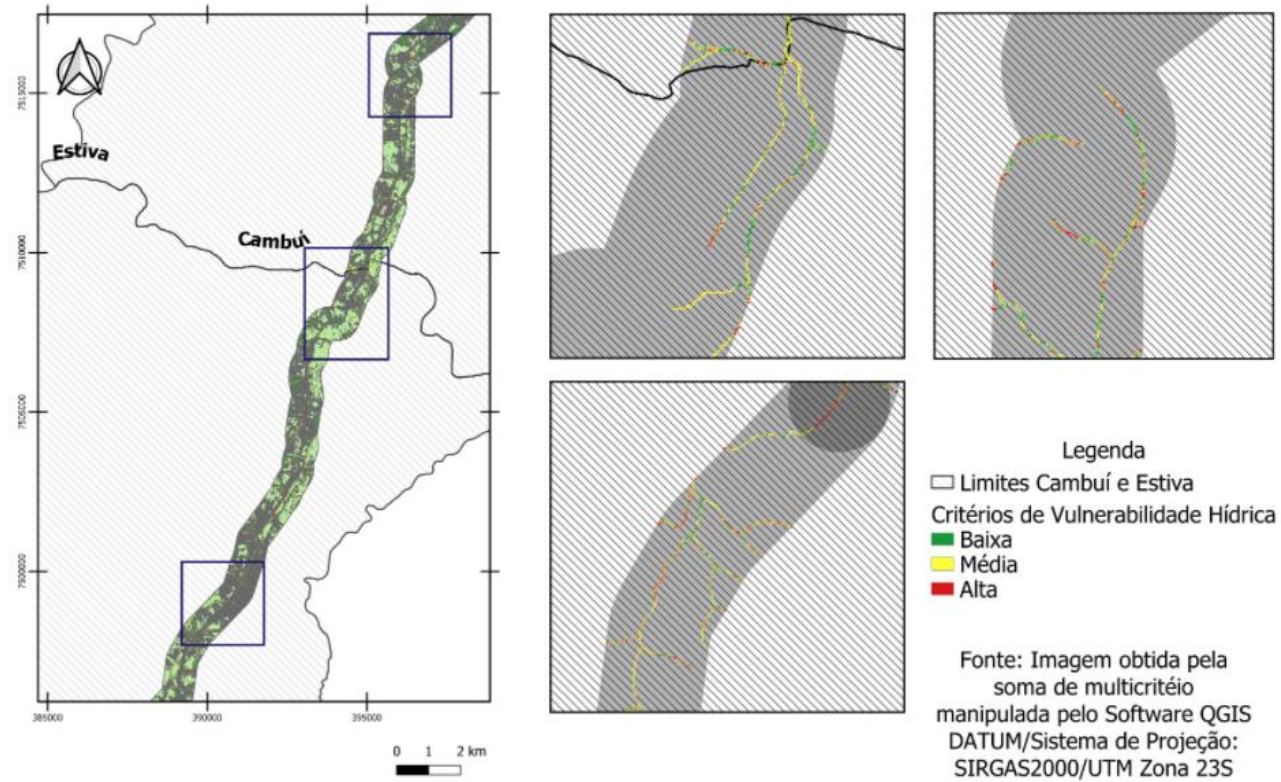


Figura 11 b – Mapa resultante da Análise Multicritério – Trecho Cambuí – Estiva, MG da BR381

Na Figura 10 pode-se verificar alguns pontos de “Alta Vulnerabilidade.

No detalhe “01”, da Figura 10 tem-se dois trechos em vermelho, próximos as cidades de Cambuí e Estiva, onde estão localizados o Rio Itaim e Rio do Peixe.

No detalhe “02”, da Figura 10 tem-se o Rio Três Irmãos um dos principais mananciais superficiais de abastecimento da cidade de Cambuí.

No detalhe “03”, da Figura 10 tem-se o Córrego da Roseta.

Diante desses fatores evidenciados nos detalhes, o mapa seria fundamental para tomada de decisão diante de um acidente rodoviário que ocorresse derramamento de produtos químicos nos pontos em questão pois o sistema de abastecimento ficaria comprometido. Faz-se necessário um plano de ação preventivo utilizando o mapa como base de estudo para que quando ocorra eventos dessa magnitude a captação seja interrompida no ponto atingido e possa ocorrer a montante do curso d’água sem comprometimento da qualidade do mesmo, abastecendo a cidade. Em contrapartida medidas mitigatórias de recuperação da área atingida deverão ser realizadas pelos responsáveis pelo transporte rodoviário do produto químico conforme seu Plano de Atendimento a Emergência, respeitando todas as medidas de contenção determinadas pelas normativas, para normalização dos cursos d’água.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As imagens de satélites usadas neste trabalho (e de outras áreas do país) estão disponíveis de forma gratuita na internet, assim como o programa QGIS. Dessa forma é possível aplicar a metodologia apresentada nesta dissertação sem a necessidade de aquisição das imagens ou de ferramentas de SIG.

O uso do Método de Análise Multicritérios (MAM) em especial ao utilizado no estudo, realizando a distribuição de pesos de acordo com suas particularidades resultando na somatória dos mapas de declividade, cursos d'água e uso e cobertura do solo permitem o diagnóstico da vulnerabilidade hídrica da área estudada.

As informações contidas no mapa de multicritérios servirão de base para a tomada de decisões diante ocorrências envolvendo derramamento de produtos químicos, em especial combustíveis para as partes interessadas particulares ou públicas que envolverão no plano de ação de recuperação da área atingida.

De acordo com o mapa de vulnerabilidade hídrica da região de estudo é possível verificar que um acidente rodoviário com derramamento de combustível poderá afetar o Rio Três Irmãos que é um dos principais mananciais superficiais de abastecimento da cidade de Cambuí. Assim, essa metodologia pode ser usada como ferramenta na gestão de crise dos municípios que se localizam nestes pontos críticos e que possam ter mananciais afetados por acidentes. Neste caso, sugere-se uma alternativa de captação.

Ações imediatas após o acidente rodoviário irão garantir que o material se espalhe e atinja os mananciais. Diante desse cenário além da concessionária responsável pela administração da rodovia, empresas de emergências químicas são acionadas e Corpo de Bombeiros para isolamento de área, contenção do produto para não atingimento de mananciais e aplicação de barreiras.

O mapa de Kernel (ou de calor) indicando os trechos de com maiores ocorrências de acidentes já representam uma poderosa ferramenta para a gestão das concessionárias que administram a rodovia, podendo prever a necessidade de obras e alterações na rodovia para aumentar a segurança.

Como sugestões para trabalhos futuros aplicar esta metodologia para outros tipos de acidentes não somente envolvendo produtos químicos, mas todos os tipos de cargas que trafegam pelas rodovias.

REFERÊNCIAS

ABIQUIM - Agenda Estratégica de Logística da Indústria Química. Disponível em: <https://www.abiquim.org.br>. Acesso em: 25 nov. 2018.

ABREU, L. A.; ARAÚJO, F. T. V.; NUNES, B. A. Modelo multicritério de decisão para análise da vulnerabilidade à desertificação no semiárido brasileiro. **Revista DAE**, v.67, p.78-94, 2019.

ANTT (Agência Nacional de Transporte Terrestres). **Resolução 3.665 de 04 de maio de 2011**. Atualiza o Regulamento para o Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos. Disponível em: <https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibelink.php?numlink=217095>. Acesso em: 08 out. 2019.

ANTT (Agência Nacional de Transporte Terrestres). **Resolução 5.232 de 14 de dezembro de 2016**. Aprova as Instruções Complementares ao Regulamento Terrestre do Transporte de Produtos Perigosos, e dá outras providências. Acesso em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/24783215. Acesso em: 08 out. 2019.

ALVES, H. Transporte de produtos inflamáveis por caminhões tanque nas rodovias federais de Minas Gerais: Estudo de caso com Acidente com Carga Perigosa na cidade de Conselheiro Lafaiete – MG. Faculdade Doctum, Juiz de Fora, 2020.

Caderno de Transportes 2018.

http://canaldoservidor.infraestrutura.gov.br/images/2019/documentos/transportes_2018_web.pdf. Acesso em: 29 mar. 2019.

COSTA, G. J. A, VIEIRA, C. I. P. Geotecnologias para análise da vulnerabilidade ambiental do núcleo de dissertação do Piauí. **Revista Caderno Prudentino de Geografia**, v.2, n.40, p.59-76, 2018.

ENRÍQUEZ, G. H.; VILLALBA, C. C.; SÁNCHEZ, M. H.; ZAMBRANO, C. N.; LÓPEZ, S. R. Estructura del sistema de información para el análisis multidimensional de la resiliencia socioecológica a través de Fuzzy AHP. **Iberian Journal of Information Systems and Technologies-risti**, n.39, p.77-90, 2021.

FERREIRA, M.N. Sensibilidade Ambiental a Hidrocarbonetos para Rodovias – Estudo de Caso em Trecho da Rodovia Anhanguera (SP-330). Tese (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2017.

GUIGUER, N. Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento. Ontário: Waterloo Hydrogeologic, 1996.

HUGHES, B. P.; NEWSTEAD, S.; ANUAND, A.; SHU, C. C. A review of models relevant to road safety. **Accident Analysis & Prevention**, v.74, p 250-270, 2015.

IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/mg>. Acesso em: 28 dez.2021.

LIU, X.; ZHANG, L.; GUO, S.; FU, M. A simplified method to evaluate the fire risk of liquid dangerous chemical transport vehicles passing a highway bridge. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v.48, p 111-117, 2017.

MALHA RODOVIÁRIA DE MINAS GERAIS. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/conheca-minas/rodovias>. Acesso em: 25 nov. 2018.

MARTINS, P. T. A. Carta de sensibilidade ambiental para derramamentos de óleo em rodovias: proposta aplicada a estrada dos Tamoios (SP-099). 2012. 172 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2012.

MIRANDA, R. D.; SILVA, W. P; ROSS, S. D. Metodologia de análise do impacto de obras de melhoria rodoviária sobre a segurança do tráfego, utilizando Sig e regressão logística multinomial. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v.7, n.1, p.8881-8902, 2021.

Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys (International Series in Operations Research & Management Science Book 233) (English Edition) 2nd Edição, eBook Kindle.

NGUYEN, A. K.; LIOU, Y.; LI, M.; TRAN, A. T. Zoning eco-environmental vulnerability for environmental management and protection. **Ecological Indicator**, v.69, p.100-117, 2016.

PERVEEN, S.; JAMES, L. A. Scale invariance of water stress and scarcity indicators: Facilitating cross-scale comparisons of water resources vulnerability. **Applied Geography**, v. 31, n. 1, p. 321–328, 2011.

PIMENTA, B. L.; BELTRÃO, N. E. S.; GEMAQUE, A. M. S.; TAVARES, P. A. Processo Analítico Hierárquico (AHP) em ambiente SIG: temáticas e aplicações voltadas à tomada de decisão utilizando critérios espaciais. **Revista Interações**, Campo Grande, MS, v.20, n. 2, p.407-420, 2019.

PIZZATO, E.; SANTOS, D. N. Aspectos ecológicos e emergências químicas em grandes rodovias: o caso da BR-116, trecho da cidade de Guarulhos (SP) Brasil. **Revista Espacios**, v.39, p.5, 2018.

SAATY, T. How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, n.48, p.9-26, 1990.

SAAE – Sistema Autônomo de Água e Esgoto de Cambuí. Disponível em: <https://saacambui.mg.gov.br/saae/abastecimento>. Acesso em: 26 jan. 2022.

SANTOS, L. L.; SILVA, M. N. Análise dos acidentes com produtos químicos ocorridos nas rodovias federais da Bahia. **Revista Ciências do Trabalho**, v.10, p.159-164, 2018.

SHUMANN, L. R. M. A; MOURA, L. B. A. Índices sintéticos de vulnerabilidade: uma revisão integrativa de leitura. **Revista Ciência & Saúde Coletiva**, v.20, n.7, 2015.

SILVA, R. M.; BELDERRAIN, M. C. N. Considerações sobre métodos de decisão multicritério. In: Encontro de Iniciação Científica e Pós Graduação do ITA, 11., 2005. Anais

[...]. São José dos Campos: XI Encita 2005. P. 1-7. Disponível em: <http://www.bibi.ita.br/xiencita/Artigos/Mec03.pdf>. 2005.

SILVA, G. J. C.; MENEZES, L. B.; NEDER, H. D. Qualidade da malha rodoviária, custos econômicos associados e determinantes dos acidentes de trânsito no Brasil: avaliação e proposição de política. **Revista de Políticas Públicas**, v.19, p.327-247, 2015.

SIQUEIRA, H. E. **Vulnerabilidade ambiental dos recursos hídricos interceptados por rodovias na bacia do rio Uberaba**. Dissertação (Mestrado). UNESP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/134298>. Acesso em 13 set. 2020.

SOUZA, A. S.; JUNIOR, I. V. S.; PACHECO, J. S.; PEREIRA, C. S. S. Avaliação do Plano Nacional de Prevenção, Preparação e Resposta Rápida a Emergências Ambientais (P2R2): estudo de caso BR 393. **Revista Tecen**, v.11, p.02-18, 2018.

SOUZA, O. M.; MACHADO, S. T. Influência da evolução da legislação e da fiscalização na incidência de acidentes com transporte rodoviário de produtos perigosos. **Revista Refas**, v.5, 2019.

TAVEIRA, J. C.; PORTELA, R. R.; MENEGANTE, R. R. Transporte rodoviário internacional de cargas perigosas. **Revista Interações**, v.20, p.225-236, 2019.

TERRA, L. G; LOBLER, C. A; SILVA, J. L. S. Estimativa da vulnerabilidade a contaminação dos recursos hídricos subterrâneos do município de Santiago-RS. **Revista REGET – Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.10, n.10, p.2208-2218, 2013.

VILLACRESES, L. F. L.; BALLADARES, I. A. F.; PISCO, A. I. M.; GUARANDA, J. R. B. Estimación de la vulnerabilidad de um territorio. **Revista Científica Multidisciplinaria**, v.5, n.2, p.141-156, 2021.