UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL - UFRGS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS – PPGE3M

LUIS ADRIEL PEREIRA

MODELAGEM DE TRAÇADOS OTIMIZADOS DE MENOR IMPACTO AMBIENTAL:
Caso da Rodovia BR-392/RS

Porto Alegre
2018

Luís Adriel Pereira

MODELAGEM DE TRAÇADOS OTIMIZADOS DE MENOR IMPACTO AMBIENTAL: Caso da Rodovia BR-392/RS

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, área de concentração Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Orientador: Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum

Porto Alegre

2018

Luís Adriel Pereira

MODELAGEM DE TRAÇADOS OTIMIZADOS DE MENOR IMPACTO AMBIENTAL:

Caso da Rodovia BR-392/RS

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, área de concentração Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS.

Orientador: Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum

Aprovado em 14 de dezembro de 2018.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Rejane Maria Candiota Tubino - UFRGS

Dr. Régis Sebben Paranhos - Unipampa

Dr. Eduardo Rodrigo Ramos de Santana - Fepam

Dedico este trabalho a minha esposa Paola e ao nosso primeiro filho que ela traz em seu ventre.

“Não podemos resolver nossos problemas com o mesmo raciocínio com que os criamos.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À minha esposa Paola que, com seu amor, apoio e incentivo, possibilitou-me superar todas as dificuldades.

A todos os familiares e amigos que contribuíram com palavras de apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Irineu Antônio Schadach de Brum pela orientação, discernimento e apoio na realização deste trabalho.

À empresa STE – Serviços Técnicos de Engenharia S.A. e ao DNIT pela disponibilização dos dados utilizados no trabalho.

RESUMO

A definição da diretriz de um novo traçado rodoviário para a ligação de dois pontos é um processo condicional no qual podem existir inúmeras alternativas, e a escolha pela mais adequada deve ser realizada considerando-se, além das questões técnico-econômicas, informações geoespacializadas essenciais a respeito dos aspectos relacionados ao meio físico, biótico e antrópico da região de interesse, de modo que o traçado definido seja aquele que represente também o menor impacto ambiental. Entretanto, este processo decisório tem sido comumente realizado sem que se considere a utilização de métodos de análise multicritério que permita uma avaliação integrada de diferentes fatores que compõem os estudos de viabilidade sob a ótica ambiental. Este trabalho visou a modelagem de traçados otimizados alternativos com menor potencial de ocasionar impactos ambientais na Área de Estudo (AE) considerada para o trecho da Rodovia BR-392, entre os municípios de Santo Ângelo e Formigueiro/RS. Utilizou-se o método multicritério Análise Hierárquica de Processos (AHP) para a obtenção de pesos relativos para diferentes critérios geoespaciais relacionados aos meios físico, biótico e antrópico. Para tanto, foram aplicados questionários a três profissionais com comprovada experiência em projetos e gestão ambiental de rodovias. Os pesos resultantes foram utilizados na modelagem de alternativas de traçado realizada em ambiente computacional SIG. Os traçados gerados foram comparados entre si e em relação ao traçado preliminar escolhido no Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da BR-392. Em geral, os critérios considerados mais importantes (valorados com os maiores pesos) de acordo com o método AHP aplicado foram a Declividade, Área de Preservação Permanente (APP) e Vias existentes. Na comparação entre os traçados modelados e o traçado definido no EVTEA, os resultados indicaram uma similitude de cerca de 88% entre os Traçados otimizados B e C, e 27% de similitude entre estes e o traçado preliminar. Tais resultados indicam que a aplicação da metodologia adotada neste estudo tem potencial satisfatório para definição de novos traçados rodoviários em substituição ao método comumente utilizado, ainda que devam ser consideradas as peculiaridades de cada caso.

Palavras-chave: AHP, Análise multicritério, Traçado otimizado, BR-392.

ABSTRACT

The definition of the guideline of a new road tracing for the connection of two points is a conditional process in which there can be many alternatives, and the most appropriate choice must be made considering, besides the technical-economic issues, geospatial information essential to respect to the physical, biotic and anthropic aspects of the region of interest, so that the defined trajectory is one that also represents the least environmental impact. However, this decision process has been commonly performed without considering the use of a multicriteria analysis method that allows an integrated evaluation of different factors that compose the feasibility studies from the environmental point of view. This work aimed at the modeling of alternative optimized tracings with less potential to cause environmental impacts in the Study Area (AE) considered for the section of BR-392 Highway, between the municipalities of Santo Ângelo and Formigueiro/RS, Brazil. The multicriteria method Analysis Hierarchical of Processes (AHP) was used to obtain relative weights for different geospatial criteria related to the physical, biotic and anthropic environments. For that, questionnaires were applied to three professionals with proven experience in projects and environmental management of highways. The resulting weights were used in the modeling of tracks alternatives performed in a GIS computing environment. The tracings generated were compared to each other and compared to the preliminary design chosen in the BR-392 Technical, Economic and Environmental Viability Study (EVTEA). In general, the criteria considered most important (valued with the largest weights) according to the AHP method applied were slope, APP and uses of existing roads. In the comparison between the modeled tracing and the tracing defined in the EVTEA, the results indicated a similarity of about 88% between the optimized tracks B and C, and 27% similarity between them and the preliminary track. These results indicate that the application of the methodology adopted in this study has a satisfactory potential for the definition of new road tracing, replacing the commonly used method, although the peculiarities of each case must be considered.

Key-words: AHP, multicriteria analysis, optimized tracing, BR-392.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura Hierárquica genérica de problemas de decisão.....26
Figura 2 - Exemplo de soma ponderada de arquivos raster para obtenção de superfície de custo 35
Figura 3 - Exemplo de Mapa de Superfície de custo acumulado (A) e Superfície de orientação de menor custo (B) 36
Figura 4 - Exemplo de vizinhança entre pixels e cálculo de comprimento das arestas 38
Figura 5 - Mapa de Localização da Área de Estudo (AE) 41
Figura 6 - Fluxograma da metodologia.....42
Figura 7 - Mapa temático de declividade da AE.....47
Figura 8 - Mapa temático dos tipos de solos da AE 49
Figura 9 - Mapa temático da hidrografia da AE.....50
Figura 10 - Mapa temático do potencial erosivo dos solos na AE.....52
Figura 11 - Mapa temático das regiões fitoecológicas identificadas na AE.....54
Figura 12 - Mapa temático das APP na AE.....55
Figura 13 - Mapa temático das áreas prioritárias para conservação na AE.....57
Figura 14 - Mapa temático de uso e cobertura do solo na AE.....59
Figura 15 - Mapa temático dos processos minerários existentes na AE.....61
Figura 16 - Mapa temático das vias existentes na AE.....62
Figura 17 - Mapa temático da malha ferroviária da AE 63
Figura 18 - Processo automatizado da modelagem de traçado otimizado.....67
Figura 19 - Mapa de suscetibilidade a impactos ambientais - Traçado Otimizado A 75
Figura 20 - Mapa de suscetibilidade a impactos ambientais - Traçado Otimizado B 76
Figura 21 - Mapa de suscetibilidade a impactos ambientais - Traçado Otimizado C 77
Figura 22 - Traçados Otimizados gerados na modelagem e o Traçado preliminar...81

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Pesos relativos referente aos critérios do meio físico atribuídos pelos avaliadores. 72
Gráfico 2 - Pesos relativos referente aos critérios do meio biológico atribuídos pelos avaliadores. 73
Gráfico 3 - Pesos relativos referente aos critérios do meio antrópico atribuídos pelos avaliadores. 73
Gráfico 4 - Extensão dos Traçados 79

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Escala Fundamental de Saaty 27
Quadro 2 - Valores do índice de consistência (CA) em função da ordem da matriz .29
Quadro 3 - Descrição do banco de dados utilizado no estudo 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de comparações paritárias 27
Tabela 2 - Matriz normalizada.....28
Tabela 3 - Normalização da Matriz.....28
Tabela 4 - Matriz comparativa do Avaliador A para os critérios do meio físico. 69
Tabela 5 - Matriz comparativa do Avaliador A para os critérios do meio biótico. 69
Tabela 6 - Matriz comparativa do Avaliador A para os critérios do meio antrópico. ..70
Tabela 7 - Matriz comparativa do Avaliador B para os critérios do meio físico. 70
Tabela 8 - Matriz comparativa do Avaliador B para os critérios do meio biótico. 70
Tabela 9 - Matriz comparativa do Avaliador B para os critérios do meio antrópico. ..71
Tabela 10 - Matriz comparativa do Avaliador C para os critérios do meio físico. 71
Tabela 11 - Matriz comparativa do Avaliador C para os critérios do meio biótico. 71
Tabela 12 - Matriz comparativa do Avaliador C para os critérios do meio antrópico. 72
Tabela 13 - Índice de Similitude obtido entre os traçados. 80

LISTA DE SIGLAS

ADA	Área Diretamente Afetada
AE	Área de Estudo
AHP	Análise Hierárquica de Processos
AIA	Avaliação de Impacto Ambiental
AID	Área de Influência Direta
AII	Área de Influência Indireta
ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
CA	Consistência Aleatória
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EVTEA	Estudos de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
IS	Índice de Similitude
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
OLI	*Operational Land Imager*
ONG	Organizações Não Governamentais
PNV	Plano Nacional de Viação
RC	Razão de Consistência
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
RPAS	*Remotely Piloted Aircraft Systems*
RUSLE	*Revised Universal Soil Loss Equation*
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SRTM	*Shuttle Radar Topographic Mission*
UC	Unidade de Conservação
UCS	Uso e Cobertura do Solo
USLE	*Universal Soil Loss Equation*
UTM	*Universal Transversal Mercator*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
2 OBJETIVOS 17
1.1 Objetivo Geral 17
1.2 Objetivos Específicos 17
3 REVISÃO DE LITERATURA 18
3.1 Implantação de Projetos Rodoviários e Meio Ambiente 18
3.2 Análise Multicritério Integrada como Apoio à Decisão 23
3.3 Sistema de Informação Geográfica Aplicado à Modelagem de Traçado 29
3.3.1 Álgebra de mapas para determinação da superfície de custo 33
3.3.2 Superfície de custo acumulado 35
3.3.3 Caminho de mínimo custo 37
4 METODOLOGIA 39
4.1 Definição da Área de Estudo: caso da Rodovia BR-392 39
4.2 Etapas da Metodologia Aplicada 41
4.2.1 Levantamento bibliográfico 42
4.2.2 Definição dos critérios utilizados na metodologia 43
4.2.3 Obtenção da base de dados geoespacializados da área de estudo 44
4.2.4 Pesos absolutos das classes dos critérios 45
4.2.5 Descrição dos critérios utilizados 46
4.2.6 Aplicação do método AHP 63
4.2.7 Preparação da base de dados geoespacializados 64
4.2.8 Aplicação de ferramentas SIG para modelagem de traçado otimizado 65
4.2.9 Comparação entre os resultados obtidos na modelagem dos traçados 68
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 69
5.1 Aplicação do método AHP para Determinação dos Pesos Relativos 69
5.2 Geração de Traçados Otimizados de Menor Impacto Ambiental 74
5.3 Análise Comparativa dos Traçados Modelados 78
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 82
6.1 Propostas para Trabalhos Futuros 84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 85
APÊNDICE 91

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura de transportes rodoviários tem a intenção de melhorar o nível de bem-estar da sociedade. Porém, a construção ou adequação de capacidade de rodovias, além de demandar o uso de uma quantidade significativa de recursos econômicos, é responsável por gerar tanto benefícios quanto danos à sociedade e ao meio ambiente, os quais não devem ser negligenciados (TSUNOKAWA e HOBAN, 1997).

Para a implantação de uma nova rodovia, no âmbito do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), existem os Estudos de Viabilidade Técnica Econômica e Ambiental (EVTEA), que representam um conjunto de estudos desenvolvidos para avaliação dos benefícios sociais e econômicos decorrentes dos investimentos em implantação de novas rodovias ou melhoramentos de rodovias já existentes (DNIT, 2007).

Uma das fases preliminares que antecede as definições do projeto geométrico de uma rodovia é constituída pelos estudos de traçado, que tem por objetivo principal a delimitação dos locais mais adequados para a implantação da infraestrutura viária, a partir da obtenção de informações básicas a respeito dos aspectos relacionados ao meio físico, biótico e antrópico da região de interesse, de forma a permitir o desenvolvimento do projeto.

A identificação de diretriz de traçado geométrico para definição de rodovias é um processo condicional, pois a partir da ligação entre dois pontos nos quais há necessidade de implantação de vias podem existir inúmeras alternativas e a escolha por uma região específica é um atrativo para a comunidade desta região (LOPES, 2015).

Em alguns casos estas definições são fomentadas por análises mais políticas do que técnicas, fato que pode criar desconforto por favorecer uma região específica em detrimento de outra, partindo do pressuposto que a criação de um sistema viário novo tende a gerar um vetor de crescimento econômico que pode acarretar em vantagens estratégicas decorrentes da oferta de acesso.

Usualmente, a definição de novos traçados rodoviários nos EVTEA é realizada tendo como uma das bases a avaliação de feições geográficas consideradas mais relevantes, no entanto, sem a utilização de método de análise multicritério para uma análise integrada que indique o melhor delineamento para o traçado preliminar.

Devido ao desenvolvimento exponencial de recursos tecnológicos e computacionais, especialmente aqueles integrados aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), este processo de definição da diretriz de novos traçados rodoviários está em contínua transformação. Portanto, também são necessárias contínuas pesquisas relacionadas ao tema no intuído tanto de aprimorar métodos existentes quanto desenvolver novas soluções que otimizem o processo decisório e que melhorem a transparência na forma como as decisões sobre a localização de uma nova rodovia são tomadas.

Ainda assim, muito embora os avanços tecnológicos estejam em constante evolução, não há um único método ou metodologia padrão para a proposição de alternativas para o planejamento territorial em se tratando da implantação de novas rodovias, visto que os objetivos também estão em constante processo de mudança, seja pela diversidade característica de cada região ou pelas interferências cotidianas do ser humano no ambiente em que vive.

Deste modo, na avaliação dos locais mais adequados para o traçado de uma rodovia, os analistas envolvidos, sejam eles os responsáveis técnicos do empreendedor, equipe consultora ou agentes dos órgãos licenciadores, deparam-se com a necessidade intrínseca de comparar, classificar ou hierarquizar múltiplos aspectos com diferentes potenciais de ocasionar impactos negativos.

Para que tal processo de diferenciação entre aspectos ou impactos mais importantes seja realizado, diversos métodos de análise multicritério têm sido desenvolvidos e empregados para subsidiar à tomada de decisões. Dentre estes, a metodologia de análise hierárquica de processos (do inglês *Analytic Hierarchy Process*), comumente denominado método AHP, vem sendo amplamente adotada em estudos de diferentes áreas do conhecimento.

A comparação paritária realizada através do método AHP consiste numa ferramenta simples de hierarquizar as preferências dos tomadores de decisão, na qual se comparam atributos dois a dois e pergunta-se qual o mais importante em relação ao objetivo global de interesse, procedendo-se da mesma forma com todos os critérios considerados.

Neste contexto, este estudo aborda o caso da BR-392, que considera o trecho descontínuo da Rodovia entre os municípios de Santo Ângelo e Santa Maria/RS, e o segmento existente entre Santa Maria e o município de Formigueiro/RS, que foram objeto do EVTEA concluído em 2012, e que teve o Estudo de Impacto Ambiental (EIA)

iniciado, mas que atualmente encontra-se paralisado. No EVTEA realizado foram analisadas três alternativas de traçado propostas a partir de direcionamentos do Dnit. Como resultado, foi indicada uma alternativa de traçado considerada mais adequada com base em diferentes fatores relacionados aos meios físico, biótico e antrópico, ainda que analisados de forma desintegrada. Entretanto, embora tenha se baseado no resultado dos estudos realizados, para a escolha deste que é chamado de Traçado preliminar, não se utilizou nenhuma metodologia multicritério para subsidiar a tomada de decisão para a escolha do traçado mais adequado.

Face ao exposto, este estudo visou a modelagem de traçados otimizados alternativos para a implantação da Rodovia BR-392, sob a ótica da suscetibilidade à ocorrência de impactos ambientais potenciais na Área de Estudo (AE) considerada.

Para tanto, fez-se uso do método de análise multicritério AHP associado a técnicas de geoprocessamento realizadas em ambiente SIG. O processo de modelagem desenvolvido permitiu a geração de traçados otimizados (ou caminho de mínimo custo, conforme comumente encontrado na literatura), definidos neste estudo como aqueles que minimizem os impactos ambientais potenciais frente aos diferentes critérios geoambientais considerados.

2 OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

O objetivo deste estudo consiste na aplicação de uma metodologia de análise multicritério associada a técnicas de processamento de dados geoambientais em ambiente computacional SIG, proposta como ferramenta de suporte à tomada de decisão para a modelagem de alternativas de traçado com menor potencial de ocasionar impactos ambientais na AE prevista para as futuras obras de implantação da Rodovia BR-392 entre os municípios de Santo Ângelo e Formigueiro/RS. Além disso, intenciona-se também contribuir para o aprimoramento de soluções otimizadas para estudos de implantação de novos projetos rodoviários.

1.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo principal, estabeleceram-se os seguintes objetivos específicos:

a) Aplicar a análise multicritério AHP integrada a um modelo de otimização de traçados de mínimo custo em ambiente SIG;
b) Gerar traçados otimizados para a Rodovia BR-392 visando a análise de cenários alternativos quanto a localização da sua implantação;
c) Comparar as alternativas de traçado otimizado obtidas através da análise multicritério integrada ao ambiente SIG em relação ao Traçado preliminar definido em EVTEA;

3 REVISÃO DE LITERATURA

Este tópico aborda os principais aspectos teóricos relativos ao uso da análise multicritério integrada aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para a otimização de traçados rodoviários e o seu potencial como ferramenta de apoio à tomada de decisão em estudos que avaliam a viabilidade de implantação de novos trechos numa determinada área.

No primeiro item da revisão, “Implantação de Projetos Rodoviários e Meio Ambiente”, é apresentada uma breve contextualização do atual cenário nacional em relação aos empreendimentos rodoviários e os principais aspectos e impactos potenciais negativos que devem ser considerados em relação a diferentes aspectos fisiográficos, bióticos, socioculturais e econômicos. Ainda, discorre-se sobre a importância de se considerar princípios de transdisciplinaridade e a análise de múltiplos critérios na fase de planejamento que antecede a definição da diretriz do traçado rodoviário, bem como no processo de licenciamento ambiental.

No item “Análise Multicritério como Apoio à Tomada de Decisão” é descrito o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), o qual é amplamente utilizado em estudos de planejamento estratégico, e que possibilita dividir problemas de complexa resolução (como é o caso da implantação de uma rodovia) em níveis hierárquicos para facilitar a compreensão e avaliação dos diferentes aspectos e critérios relevantes.

O item seguinte, “Sistema de Informação Geográfica Aplicado a Modelagem de Traçado”, trata de aspectos básicos sobre o uso das ferramentas dos SIG na análise espacial em que são considerados múltiplos critérios, analisando, especificamente, a utilização das ferramentas para a otimização de traçados disponíveis no aplicativo Arcmap do sistema ArcGIS, utilizado no estudo. São apresentados também exemplos de estudos em que se aplicou a análise multicritério integrada a SIG como forma de planejamento e avaliação do espaço territorial em obras de infraestrutura linear.

3.1 Implantação de Projetos Rodoviários e Meio Ambiente

O setor dos transportes no Brasil é responsável pelo desenvolvimento de diversos outros setores da economia, influenciando decisivamente nas atividades comerciais, industriais e de serviços, além do papel que exerce no bem-estar social

pela acessibilidade que promove, tanto de mercadorias como de pessoas e nos seus efeitos multiplicadores, no que concerne à geração de emprego e renda (COSTA, 2010).

A malha rodoviária brasileira atualmente é de cerca de 1,7 milhões de quilômetros (km), sendo 157,5 mil km de vias planejadas (9%). Desta malha total, conforme os dados do Relatório do Plano Nacional de Viação (PNV) de 2015, cerca de 120 mil km são rodovias Federais sob jurisdição do Dnit, onde cerca de 64 mil km são pavimentadas, 12 mil não pavimentadas e aproximadamente 44 mil estão em fase de planejamento, que corresponde a pouco mais de um terço do total da rede federal (CNT, 2017). Destaca-se que o total de rodovias federais planejadas passou de cerca de 46 mil para 43.963 km entre 2001 e 2015, o que significa que aproximadamente 2,1 mil km de novas rodovias saíram do papel e passaram, efetivamente, a existir neste período. Rodovias planejadas são aquelas fisicamente inexistentes, mas para as quais são previstos pontos de passagem que estabelecem uma diretriz destinada a atender uma demanda potencial de tráfego. Estes pontos de passagem não são obrigatórios até que a realização de estudos e/ou projetos estabeleçam o traçado definitivo da rodovia (BRASIL, 2007).

Segundo GOES (2014), ocupações de áreas que anteriormente não tinham condições de atrair investimentos são proporcionadas quando instalados os empreendimentos de infraestrutura. Os espaços e recursos que anteriormente estavam ociosos ou subutilizados do ponto de vista da produtividade econômica recebem uma nova forma de uso dos territórios com a implementação da malha rodoviária. As novas atividades passam a explorar os recursos de maneira acelerada e com tecnologias mais avançadas, no entanto, acarretam em densa ocupação e no uso degradante dos recursos ambientais.

Bocanegra (2017) destaca o papel crucial da infraestrutura de transportes rodoviários no desenvolvimento econômico e na consequente melhora do nível de bem-estar da sociedade. Porém, ressalta que a construção[1] de uma nova rodovia, além de demandar o uso de uma quantidade significativa de recursos monetários públicos, é responsável por gerar danos à sociedade e ao meio ambiente, os quais não devem ser negligenciados.

[1] Neste estudo o termo “construção”, conforme o manual de terminologias rodoviárias do Dnit, refere-se à execução de uma obra rodoviária que pode ser apenas de implantação ou de implantação e pavimentação.

De acordo com Schäfer (2004), até a década de 50, na seleção de traçados para a construção de novas rodovias eram considerados somente os aspectos geométricos e geotécnicos, com base no mínimo custo monetário para a construção e no relativo retorno financeiro dos investimentos, fato este que causou problemas de ordem técnica que, somados ao descontrole do uso e a ocupação do solo, resultou em severas consequências ao meio ambiente.

Para Moreno (2000) apud Queiroz et. al (2014), nos projetos rodoviários a definição quanto à localização do traçado da estrada constitui a decisão mais crítica, enquanto a sua construção determinará, principalmente, o tipo e a magnitude dos impactos ambientais e sociais que a mesma causará.

Da alteração ocasionada na configuração territorial, característica de empreendimentos que abrangem ampla extensão territorial como as rodovias, surgem processos de conflitos entre a população afetada e que depende da disponibilidade e qualidade dos recursos naturais, e os incentivadores dos empreendimentos. Enquanto uns adotam uma postura de não concordarem com a instalação na área pretendida, os outros assumem um papel de defesa pela implantação do empreendimento. Isto não significa que os moradores locais sejam necessariamente contrários aos empreendimentos, até porque muitas vezes estes se apoiam pela possibilidade de novos empregos e movimentação da economia, salvo quando há uma identidade territorial da população envolvida (SANCHEZ, 2013).

Segundo Gallardo (2004), o desenvolvimento de grandes projetos de infraestrutura rodoviária tem sido responsável pela modificação de grandes regiões do país, tanto na dinâmica de desenvolvimento sociocultural da localidade, quanto em seu ambiente físico e biótico. Para a autora, devido à sua grande extensão, as rodovias geralmente atravessam ambientes diversos, formados por diferentes formações geológicas, estruturas geomorfológicas, tipos de solos, formações florestais, grupos faunísticos, ambientes sociais e aspectos econômicos distintos, bem como rios, córregos, lagos, manguezais, talvegues de drenagem, bacias hidrográficas.

A implantação de projetos rodoviários, conforme observado por Costa (2010, p. 4),

> [...] além de alterar as condições naturais das regiões por onde cruzam, induzindo a modificações das suas condições socioeconômicas, culturais e ambientais, muitas vezes resultam em impactos significativos ao meio ambiente, alterando todo o contexto original da paisagem local. Exemplos disso são as interferências nas dinâmicas do ecossistema regional, com prejuízos à fauna e flora; alterações dos processos de dinâmica superficial (processos erosivos, escorregamentos e assoreamentos); e das condições sociais e econômicas exercidas pelas comunidades, como intervenções em áreas de terceiros, alteração do uso e ocupação do solo, perda de solos agricultáveis, relocação de população de locais a serem utilizados pela rodovia, formação de núcleos urbanos de baixa renda nas proximidades da faixa de domínio, entre outros.

Góes (2014) menciona que importantes interferências recaem sobre diferentes grupos sociais que dependem dos recursos ambientais, e que, por isso, são potencialmente conflitantes com os empreendimentos de grande infraestrutura. Entre estes grupos estão as instituições que buscam os recursos ambientais com a intenção de conservação da natureza e os grupos que utilizam os recursos como principal meio de trabalho. Os primeiros, que podem ser denominados conservacionistas, são compostos principalmente pelas Organizações Não Governamentais (ONG), profissionais de órgãos ambientais governamentais, acadêmicos engajados e movimentos sociais ambientalistas. Os segundos são as populações que dependem dos recursos ambientais como meio de subsistência, dentre os quais se destacam as comunidades locais, comunidades tradicionais e os movimentos sociais que estas compõem, como quilombolas, indígenas e assentamento rurais.

Historicamente, a infraestrutura de transportes inicialmente implantada no Brasil, especialmente no período desenvolvimentista entre as décadas de 50 e 70, foi desprovida de preocupações com as questões socioambientais, que ainda não constituíam parte da pauta de discussões políticas e das ações governamentais (ROSCOE, 2011).

Da natureza conflitante entre a necessidade de infraestrutura e desenvolvimento e impactos ambientais causados por grandes empreendimentos é que, a partir da década de 80, teve origem no Brasil a formulação de diretrizes e regulamentações legais e normativas. Até então, não havia no país considerações de ordem ambiental quando da tomada de decisões sobre a implantação e construção de novas rodovias.

Com a aprovação da Lei Federal 6.938/81 que instituiu a Política Nacional do Meio Ambiente e a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), iniciou-se a tomada das primeiras medidas de cunho ambiental na implantação de

novos empreendimentos. Mas foi com a aprovação da Resolução nº 001 de 17 de fevereiro de 1986 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (Conama), que a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) realmente passou a ser aplicada. Esta Resolução definiu as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da AIA, trazendo ainda uma lista exemplificativa das atividades "modificadoras do meio ambiente", cujo licenciamento deveria ser precedido da elaboração e aprovação de um Estudo de Impacto Ambiental – EIA e Relatório de Impacto Ambiental – RIMA (BRASIL, 1986). O EIA/RIMA passa, então, a se constituir em importante componente das decisões referentes à implementação de projetos, devendo ser apresentado na fase de planejamento, pesquisa e levantamentos da atividade, com o objetivo de verificar a viabilidade ambiental para a localização de um empreendimento (JESUS, 2000 apud SHAFER, 2004).

No caso da construção de uma rodovia, além do EIA/RIMA, outros estudos são necessários ainda na fase de planejamento, os quais abordam os aspectos ambientais relacionados à prévia localização e instalação de uma atividade ou empreendimento, e se configuram como subsídio ao processo de licenciamento ambiental (SIMONETTI, 2010).

Atualmente, é a partir dos Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA), instituído pelo DNIT, que são analisadas as alternativas e se define um traçado preliminar para a construção de uma nova rodovia, integrando à análise de viabilidade técnico-econômica, o estudo preliminar dos impactos ambientais potenciais decorrentes das alternativas consideradas. Conceitualmente, os EVTEA compreendem:

> o conjunto de estudos necessários à verificação da existência de viabilidade técnica, econômica e ambiental para a execução de uma determinada obra de infraestrutura de transportes, ou conjunto delas, nos segmentos considerados, dentre as alternativas propostas, consubstanciado, principalmente nos estudos de tráfego, capacidade da rodovia e seu nível de serviço, aliados às pesquisas complementares e outras similares, bem como aos demais trabalhos e estudos de engenharia, socioeconômicos e ambientais necessários. (BRASIL, 2006. p. 31)

O EVTEA é fundamental para garantir subsídio ao desenvolvimento do projeto de instalação e para as operações do empreendimento porque identifica a alternativa mais viável para a sociedade dentre as possíveis soluções elencadas preliminarmente.

Os estudos são desenvolvidos em duas fases identificadas como: Preliminar - onde são desenvolvidos os estudos de traçado, estudos de tráfego, estudos socioeconômicos e estudos ambientais; e a Definitiva - na qual são desenvolvidas a definição e cálculo dos custos, definição e cálculo dos benefícios e a comparação entre custos e benefícios (BRASIL, 2006). O EVTEA deve demonstrar se a alternativa escolhida, sob o enfoque de traçado e características técnicas e operacionais, oferece maior benefício que outras, em termos de custo total de transporte. Com a elaboração dos EVTEA, as análises de traçado não se limitam mais a aspectos geométricos e de relevo como antigamente.

O EVTEA não se configura num instrumento definitivo, ou seja, não faz parte do processo de licenciamento ambiental. No entanto, tem grande importância, visto que os resultados obtidos necessariamente deverão ser utilizados no EIA e na fase de solicitação da Licença Prévia (LP), bem como subsidiarão a elaboração do projeto básico e executivo das obras a serem realizadas (BRASIL, 2006).

Assim, já na elaboração do EVTEA para a construção de uma nova rodovia é realizada uma caracterização e análise ambiental preliminar, na qual são verificadas a observância da legislação ambiental e as normas aplicáveis, bem como podem ser identificadas as principais interferências potencialmente geradoras de impactos ambientais que estejam associadas as alternativas dos traçados propostos (DER/PR, 2000). Posteriormente, na elaboração do EIA/RIMA, o traçado preliminar definido pode ser reavaliado frente à análise detalhada dos aspectos e impactos ambientais realizada na etapa de AIA.

3.2 Análise Multicritério Integrada como Apoio à Decisão

O planejamento do uso do espaço territorial, face à interferência nos recursos humanos e naturais decorrentes da implantação de um projeto rodoviário que, pela sua característica linear, intercepta diferentes composições da paisagem, configura-se como um problema estratégico e de caráter multicriterial, haja vista que assim como não há um único objetivo em questão, as percepções de importância dos recursos disponíveis e soluções possíveis também não são exclusivas.

Entretanto, na prática, conforme abordado por Pillar (2003), cada potencial tomador de decisão privilegiará um aspecto sobre outro de acordo com suas preferências e convicções, onde, por exemplo, uns conduzirão suas escolhas

baseadas na conservação dos recursos naturais enquanto outros ensejarão um menor custo monetário para execução do projeto.

É neste cenário de potenciais conflitos que, segundo o autor mencionado, modelos e metodologias têm sido elaborados visando propiciar as condições necessárias para orientar as discussões e apoiar a tomada de decisão final.

Para Lima (2015), nas áreas do conhecimento que envolvem o planejamento estratégico, é de suma importância o uso de ferramentas multiobjetivo ou multicritério para apoio à tomada de decisão, principalmente na área de transportes, nas quais existe uma gama de fatores que o envolvem, não apenas de forma técnica, mas também econômica, ambiental e sociocultural.

A análise multicritério apresenta-se nesse contexto sob a forma de diferentes métodos que buscam padronizar o processo de tomada de decisão através da modelagem matemática, fornecendo subsídios aos diferentes atores envolvidos, agregando informações de naturezas distintas sobre uma base comum, permitindo comparações e simulações de alternativas (SÁNCHEZ, 2013).

Para a realização de uma análise multicritério o estudo deve considerar a seleção e representação das variáveis que caracterizam o fenômeno (critérios), organização dessas em planos de informação, discretização dos planos em resolução espacial adequada, combinação das variáveis de forma que elas possam representar a complexidade da realidade e, por último, a possibilidade de calibração e validação do sistema mediante identificação e correção das relações construídas entre as variáveis mapeadas (MOURA, 2007).

Na literatura constam diversas técnicas que foram desenvolvidas para realizar análises multicritério, destacando-se, segundo Rafaeli (2009): Elimination Et Choix Traduisant la REalité – ELECTRE; Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations – PROMETHEE; Multi Attribute Utility Theory – MAUT; Analytic Hierarchy Process – AHP; Non-Traditional Capital Investment Criteria – NCIC; Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique – MACBETH; Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS; Data Envelopment Analysis – DEA; e Tomada de Decisão Interativa Multicritério – TODIM.

Dentre estes, merece destaque a Análise Hierárquica de Processos - AHP (do inglês, Analytic Hierarchy Process) proposta por Saaty (1980), que é baseado na divisão do problema de decisão em níveis hierárquicos para melhor compreensão e avaliação. O Método AHP é simples, confiável e permite a utilização de dados

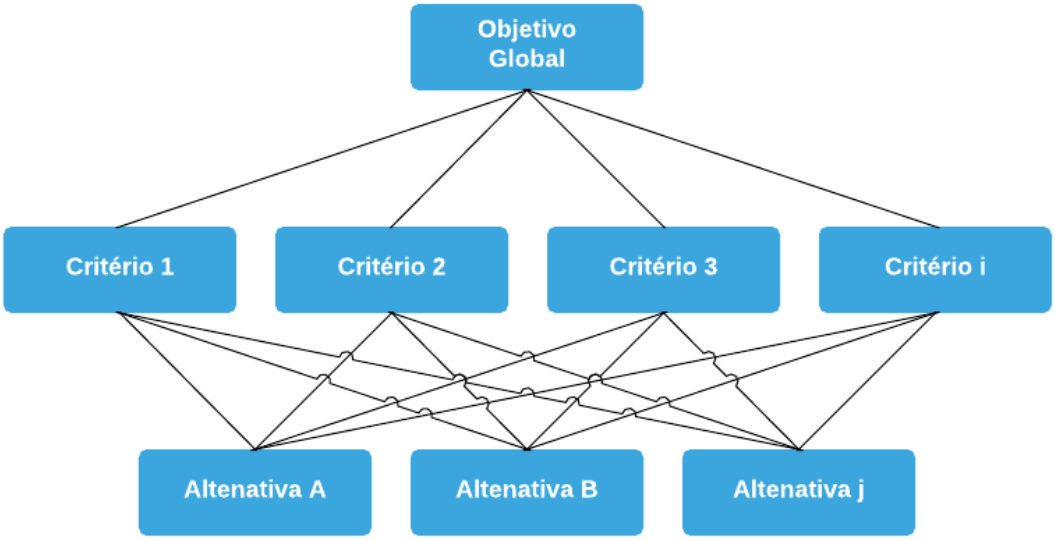
qualitativos e/ou quantitativos mensuráveis, sendo estes tangíveis ou intangíveis na análise de critérios. Tem sido mundialmente utilizado para auxiliar os processos de decisão considerando diferentes áreas, tais como economia, política, medicina, educação, tecnologia, entre outras (SAATY, 1991).

De acordo com Saaty (2005), umas das utilidades de uma hierarquia é que ela permite efetuar julgamentos focados separadamente em cada uma das diversas variáveis e a forma mais efetiva para isso é julgar pares de elementos em relação a uma única propriedade, sem preocupação com outras propriedades ou elementos. É por esta razão que comparações pareadas, associadas a estruturas hierárquicas, são tão úteis para mensurar a preferência de alternativas em relação a um objetivo.

O julgamento no método AHP baseia-se na comparação dos elementos da estrutura e na atribuição de pesos a esses elementos segundo uma escala absoluta ou relativa de valores. Portanto, para compreender o processo de julgamento do método AHP é necessário entender as matrizes de comparação paritárias e os tipos de escala de comparação (SAATY, 2008).

Segundo Saaty (1991), esta forma de análise hierárquica reflete o que parece ser o método natural de funcionamento da mente humana, isto é, diante de um grande número de elementos (controláveis ou não), estes são agregados em grupos segundo propriedades comuns, em que o cérebro humano repete esse processo e agrupa novamente os elementos em outro nível “mais elevado”, em função de propriedades comuns existentes nos grupos de nível imediatamente abaixo. A repetição dessa sistemática atinge o nível máximo quando este representa o objetivo do processo decisório, formando, através de níveis estratificados, o que pode ser definido como hierarquia, conforme exemplificado na Figura 1 a seguir.

Figura 1 - Estrutura Hierárquica genérica de problemas de decisão



Fonte: Elaborado pelo autor, a partir de Saaty (1991).

Segundo Chan e Chan (2003), além da simplicidade, facilidade de uso e capacidade de lidar com estruturas complexas, as habilidades de lidar com critérios tangíveis e intangíveis e de estruturar problemas de forma hierárquica são duas grandes vantagens que diferenciam o AHP de outros métodos de suporte à tomada de decisões.

Deste modo, o método AHP pode ser entendido como uma teoria geral para mensurar a dominância ou preferência de elementos em relação a um objetivo geral, com base em comparações pareadas. As comparações podem ser feitas através de medidas reais ou por meio de uma escala fundamental que reflete a importância relativa das preferências e percepções, utilizadas para colocar em escala elementos de uma mesma estrutura hierárquica, com elementos independentes entre si em cada nível (SAATY, 1980).

Essa escala relaciona valores numéricos com valores verbais, sendo que seus valores variam de 1 até 9. Uma das bases conceituais para justificar esse valor está associada à limitação humana para distinguir níveis de intensidade nos diversos sentidos: audição, olfato, paladar etc. Essas características são descritas por Miller (1956) apud Saaty (1991) como subsídio para criar essa escala. Outra característica importante associada a esse julgamento é que independe do tipo de critério usado (quantitativo ou qualitativo/subjetivo) a escala é aplicável. A escala é ilustrada no
Quadro 1 a seguir.

Quadro 1 - Escala Fundamental de Saaty

Definição	Grau de Importância	Recíproco[2]	Significado
Mesma importância	1	1	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
Pequena importância de um sobre o outro	3	1/3	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério levemente em relação ao outro
Grande importância ou essencial	5	1/5	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em relação ao outro
Forte importância	7	1/7	Um critério é fortemente favorecido em relação ao outro e sua dominância pode ser verificada na prática.
Importância absoluta	9	1/9	A evidência favorece um critério em relação ao outro com grau de certeza mais elevado
Valores intermediários entre valores adjacentes	2,4,6,8	1/n	Quando se procura uma condição de compromisso entre dois critérios.

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Saaty (1991).

Os números ímpares da tabela são normalmente utilizados para assegurar razoável distinção entre os pontos da medição, enquanto que o uso dos números pares deve ser adotado apenas quando existir a necessidade de negociação entre os avaliadores e quando o consenso natural não for obtido, gerando a necessidade de determinação de um ponto médio como solução (condição de compromisso).

A partir da escala fundamental de Saaty, é construída uma matriz de comparação apresentada no exemplo da Tabela 1.

Tabela 1 - Matriz de comparações paritárias

Critérios	Critério X	Critério Y	Critério Z
Critério X	1	1/5	3
Critério Y	5	1	9
Critério Z	1/3	1/9	1
Total	**6,33**	**1,31**	**13,00**

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na sequência (Tabela 2) dividem-se os elementos de cada coluna pela soma da mesma, obtendo-se a sua normalização. Somam-se os elementos de cada linha resultante e divide-se esta soma pelo número de elementos na linha.

[2] Comparação inversa para os mesmos critérios pareados.

Tabela 2 - Matriz normalizada

Critério	Normalização da coluna		
Critério X	1/6,33 = 0,157	1/5 / 1,31 = 0,152	3/13 = 0,230
Critério Y	5/6,33 = 0,789	1/1,31 = 0,763	9/13 = 0,692
Critério Z	1/3 / 6,33 = 0,052	1/9 / 1,31 = 0,084	1/13 = 0,076

Fonte: Elaborado pelo autor.

A determinação da contribuição de cada critério na meta global é calculada a partir do vetor de prioridade, conforme exemplo a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 - Normalização da Matriz

Critério	Cálculo do vetor prioridade	Vetor prioridade (Peso Relativo)
Critério X	(0,157+0,152+0,230)/3 = 0,179	17,90%
Critério Y	(0,789+0,763+0,692)/3 = 0,748	74,80%
Critério Z	(0,052+0,084+0,076)/3 = 0,070	7,00%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor do vetor prioridade determina a participação daquele critério no resultado total do objetivo. No exemplo apresentado o critério Y tem um peso relativo de 74,80% em relação ao objetivo global. Uma avaliação positiva nesse critério contribui aproximadamente 10 (dez) vezes mais do que uma avaliação positiva no critério Z (peso de 7,00%).

O método AHP transforma as comparações, na maior parte das vezes empíricas, em números que são processados e comparados. Essa capacidade de conversão de dados empíricos em um modelo matemático também se constitui como um diferencial do AHP com relação a outras técnicas comparativas (SORDYL, 2015).

Outra vantagem do método AHP sobre os demais métodos de análise multicritério é que ele admite a inconsistência como um atributo inerente ao comportamento humano. Deste modo, a qualidade dos dados de entrada pode ser verificada através da avaliação da consistência com que um decisor faz um julgamento. Esta verificação tem por finalidade avaliar se os decisores foram consistentes (coerentes) nas suas opiniões. Por exemplo, considerando que decisores indicam que o critério Y é mais importante do que o critério X e este é mais importante do que o critério Z, seria inconsistente na tomada de decisão se o critério Z fosse avaliado como mais importante do que o critério Y (se Y>X e X>Z, logo, seria inconsistente afirmar que Y<Z).

Neste caso, o método permite a verificação da coerência dos julgamentos, com uma análise do autovalor (λ) da matriz de julgamentos. Caso todos os julgamentos

sejam coerentes entre si, o autovalor máximo, ($\lambda_{máximo}$), será igual à ordem da matriz. Com isso, Saaty (1980) propõe o cálculo da Razão de Consistência (RC) para testar a consistência da resposta, o que indica se os dados estão logicamente relacionados. A verificação da consistência dos julgamentos pode ser realizada através do seguinte procedimento:

a) Estima-se inicialmente o autovalor ($\lambda_{máximo}$). A estimativa pode ser realizada pela seguinte equação: $\lambda_{máximo}$ = w.v, onde w é calculado pela soma das colunas da matriz de comparações e o vetor prioridade v;

b) Calcula-se então, o Índice de Consistência (IC), através da seguinte equação:

$$IC = \frac{\lambda_{máximo} - n}{\mathrm{n} - 1}$$

A partir do cálculo do IC e de um índice de Consistência Aleatória (CA) é calculada a Razão de Consistência (RC). O RC é resultado da seguinte equação:

$$RC = \frac{IC}{\mathrm{CA}}$$

O índice CA, apresentado no Quadro 2, é proveniente de uma amostra de 500 matrizes recíprocas positivas, geradas aleatoriamente, de tamanho até 15 por 15 (SAATY, 1991). Considera-se aceitável uma RC < 0,10, isto é, quando o valor de RC for 10% ou menos do que o respectivo índice aleatório. No caso do índice de consistência se mostrar insatisfatório, as comparações referentes a esta matriz deverão ser revistas novamente.

Quadro 2 - Valores do índice de consistência (CA) em função da ordem da matriz

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CA	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de Saaty (1991, p. 27).

3.3 Sistema de Informação Geográfica Aplicado à Modelagem de Traçado

O termo Sistemas de Informação Geográfica (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam

informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial.

O que distingue um SIG de outro sistema de informação são as funções que realizam análise espacial. Tais funções utilizam os atributos espaciais e não espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados e permitem criar simulações (modelos) que representem o mundo real, seus aspectos ou parâmetros (CAMARA et al. 2001)

Miranda (2010) define um SIG como um ambiente que tem componentes de informática, módulos de programas de aplicação e recursos humanos. Como componentes de informática, destacam-se os equipamentos de entrada como GPS, mesas digitalizadoras; equipamentos para processamento, neste caso os computadores; e equipamentos de saída são impressoras e monitores. Os módulos de programas de aplicação são softwares e aplicações implementadas em ambiente computacional para tratamento e análise dos dados espaciais, gerando produtos como mapas, planilhas, gráficos e outros tipos de informação. Já o recurso humano é responsável por definir projetos, implementar, usar e prestar assistência ao SIG, o que demanda pessoas treinadas e conhecedoras das funcionalidades do sistema.

As aplicações implementadas em ambiente computacional são utilizadas para tratamento e análise das informações geográficas para gerar os produtos desejados. Existem diversos softwares SIG disponíveis para análise e tratamento de dados espaciais, com destaque para o ArcGIS, IDRISI, Global Mapper (softwares pagos), SPRING e QGIS (gratuitos), dentre outros.

A representação espacial dos dados nestes softwares pode ser feita basicamente de duas formas: Por arquivos no formato matricial (*raster*) e por arquivos no formato vetorial. Os arquivos *raster* são formados por uma matriz de pixels (ou células), de dimensões definidas, em que cada pixel possui um único valor numérico que representa uma condição da área coberta por essa célula, por exemplo a topografia de uma determinada região pode ser representa por um arquivo *raster* em que cada pixel possui um valor de cota correspondente à cota média para a área daquele pixel. A dimensão dos pixels é denominada resolução espacial, e indica o valor do comprimento das arestas dos pixels. O modelo matricial apresenta certos problemas, como restrições decorrentes de uma representação discreta das informações espaciais e certa imprecisão na representação dos limites de feições geográficas.

A representação vetorial surge como solução a estes dois problemas em que as informações são representadas por elementos com sua própria geometria de pontos, linhas e polígonos, permitindo que todas as posições, comprimentos e dimensões possam ser definidas exatamente (MIRANDA, 2010).

Para Vettorazzi (2006), a utilização de um SIG pode auxiliar na análise da distribuição espacial dos impactos ambientais. No entanto, é na integração deste com a análise multicritério que o potencial desse tipo de solução é mais bem explorado quando se trata de análises espaciais.

Sánchez (2013, p. 348) cita como exemplo a aplicação do uso de múltiplos critérios em SIG para a “escolha do traçado rodoviário que menor interferência causa em atributos ambientais escolhidos”, sendo necessário para isso dar um peso a cada um dos atributos.

Segundo Câmara e Davis (2014), os modelos de análise multicritério são facilmente integráveis em SIG e aproveitam as capacidades destes em analisar grandes quantidades de informação sobre o território. Complementarmente e, visando facilitar a tomada de decisão, é possível trabalhar com a simulação dos resultados obtidos para os vários cenários de avaliação.

Diversos estudos realizados têm demonstrado o potencial de aplicação da análise multicritério integrada ao ambiente SIG no planejamento de projetos e na avaliação de impactos ambientais, sendo utilizado na seleção de traçados de projetos lineares, cujo procedimento envolve a atribuição de importância às diferentes variáveis mapeadas.

Assim, a modelagem de traçados (ou caminhos) otimizados (ou de menor custo[3]) através da análise multicritério e SIG tem sido aplicada em estudos de diferentes tipos de obras de infraestrutura linear, tais como dutovias, minerodutos, rodovias, ferrovias e linhas de transmissão.

Lisboa (2002) aplicou o método de auxílio à tomada de decisão denominado Método AHP ao estudo de alternativa de traçado de um trecho do rodoanel Mário Covas, na região metropolitana de São Paulo.

Pillar (2003) incorporou a análise além dos atritos de cunho ambiental e econômico, o atrito político, que no caso referia-se a anseios dos setores políticos e

[3] Entenda-se o termo “custo” utilizado neste trabalho como a resistência ou dificuldade para o traçado rodoviário atravessar a área de estudo.

também de imobiliárias, sobre sistema de apoio à decisão para otimização de traçados de obras de engenharia civil.

Weber et al. (2005) aplicaram ferramentas de apoio à decisão em SIG para avaliar alternativas de traçados de uma estrada a ser pavimentada. A partir de variáveis como uso do solo, modelo digital de elevação, mapa geotécnico e de estradas vicinais existentes, foram gerados cenários distintos, nos quais cada variável recebeu pesos diferentes de acordo com a sua importância relativa no cenário considerado.

Garcia (2011) realizou estudo semelhante, no qual, fazendo uso de técnicas de geoprocessamento e análise multicritério propôs a utilização das bacias hidrográficas como área de influência para a otimização de traçado para inserção da Rodovia Federal TO-247, considerando aspectos construtivos, ambientais e socioeconômicos.

Bagli, Geneletti e Orsi (2011) realizaram uma avaliação multicritério integrada em SIG para analisar a rota mais adequada para uma linha de energia localizada em Rimini, nordeste da Itália, considerando a minimização de impactos sobre três aspectos principais: saúde humana, paisagem e ecossistemas.

Lacerda (2011) propôs um caminho de menor custo para o mineroduto da Ferrous Ressources do Brasil S/A que se estende da mina de VIGA, no município de Congonhas, Minas Gerais, até o município de Presidente Kennedy, no Espírito Santo. Para tanto, utilizou uma adaptação do método AHP integrado ao ambiente SIG.

No estudo realizado por Mesquita (2013) foi utilizada uma metodologia capaz de determinar o percurso mais eficiente para implantação de gasodutos para o transporte de CO_2 capturado de instalações industriais e armazenado em reservatórios geológicos. O estudo foi realizado para analisar os investimentos necessários para a implementação dos gasodutos na região do Meridiano Ocidental através da análise multicritério e caminho de menor custo.

Lima (2015) desenvolveu uma metodologia de otimização de traçados de linhas de transmissão (LT) em relação a custos de implantação, em que também fez uso do método AHP para determinar os pesos de diferentes critérios, utilizando um conjunto de ferramentas SIG para simulação de rotas de menor custo monetário no software QGIS 2.6.0.

A metodologia mais largamente empregada nos softwares SIG para determinação de traçados otimizados é dividida, basicamente, em três etapas: confecção de uma superfície de custo (*cost surface*) através da álgebra de mapas,

determinação de uma superfície de custo acumulado ou distância de custo (*cost distance*) e determinação do caminho de mínimo custo (*least cost path*).

3.3.1 Álgebra de mapas para determinação da superfície de custo

O termo "Álgebra de Mapas" é utilizado na literatura de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto para denotar o conjunto de operadores que manipulam campos geográficos (imagens, mapas temáticos e modelos numéricos de terreno).

Segundo Câmara et al. (2001, p. 448), a álgebra de mapas indica:

> [...] o conjunto de procedimentos de análise espacial em Geoprocessamento que produz novos dados, a partir de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas [...]. Os mapas são tratados como variáveis individuais, e as funções definidas sobre essas variáveis são aplicadas de forma homogênea a todos os pontos do mapa.

Através de uma estrutura de representação computacional, a álgebra de mapas permite criar relações de atributos (ou critérios) através da sobreposição de características de duas ou mais camadas de informação, onde as características de cada camada são combinadas de forma a criar novas características de *output* (CÂMARA e DAVIS JR, 2014).

A álgebra de mapas utiliza expressões do tipo matemático para combinar níveis de informação (*overlay*) em formato *raster* utilizando operadores aritméticos, relativos, booleanos ou lógicos. Assim, utiliza-se a álgebra de mapas para conceber nova informação de uma base de dados disponível e baseada no conhecimento de relações e processos. Um novo mapa pode ser produzido utilizando equações de álgebra ou algoritmos e imagens *raster*, as quais atuam como variáveis numa equação matemática. A equação é aplicada a cada célula da imagem, modificando-as de acordo com esta equação e o resultado dependerá do valor inicial de célula, obtendo-se como resultado final do processamento, mapas que representam as características relativas aos dados da área estudada.

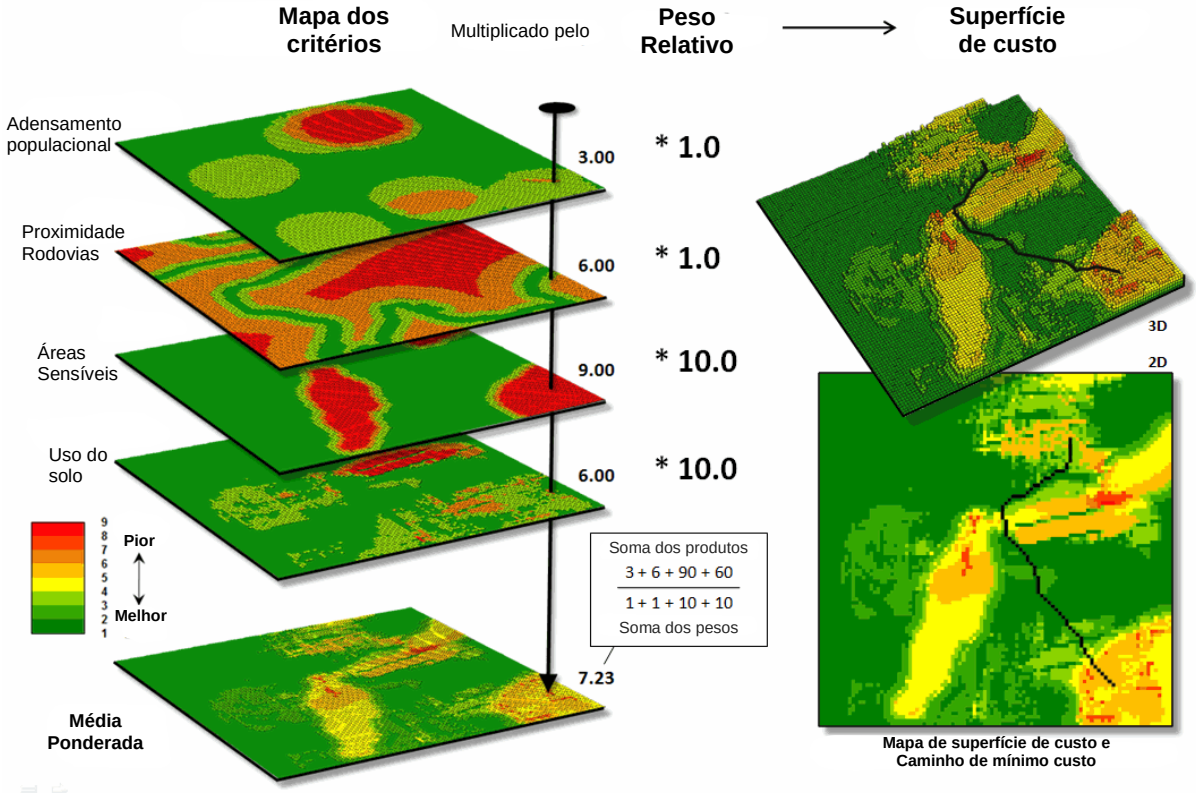
Para a escolha de traçados de projetos lineares podem ser elaborados mapas temáticos que representam as características ambientais (por exemplo, vegetação, solos, declividade), seguida pela superposição destes (técnica de *Overlay*) através do uso de ferramentas de álgebra de mapas. Neste procedimento, atribui-se um peso relativo a cada mapa temático.

A superfície de custo, também denominada de matriz de pesos, representa então, uma combinação de diferentes mapas temáticos gerados a partir dos critérios utilizados, que oferece maior ou menor resistência a travessia, de acordo com as importâncias das feições geograficamente representadas no ambiente computacional. Por exemplo, uma obra de infraestrutura linear que necessite atravessar uma determinada área para chegar a um destino (LACERDA, 2011).

O termo custo não representa, necessariamente, valor monetário. Pode expressar também tempo, distância, risco, impacto ambiental ou outros aspectos, dependendo do tipo de estudo para o qual é aplicada tal técnica (COLLISCHONN et al, 2008). O custo representa, então, o esforço relativo necessário para alcançar cada pixel do mapa em função da distância percorrida desde a origem, ou a resistência proporcionada ao longo do caminho.

Deste modo, a análise de uma superfície de custo pode valer-se do uso da álgebra de mapas, bem como de algoritmos específicos disponíveis nas ferramentas SIG para calcular o custo cumulativo de se deslocar sobre uma paisagem. Um exemplo de modelo de superfície de custo pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Exemplo de soma ponderada de arquivos raster para obtenção de superfície de custo



Fonte: Adaptado de Barry (2007)[4]

3.3.2 Superfície de custo acumulado

Devido às características anisotrópicas da Superfície de Custo que representa as feições geográficas consideradas (por exemplo, declividade, solo), o custo (ou a dificuldade) de atravessar um determinado local pode variar dependendo da distância e direção em que se pretende seguir.

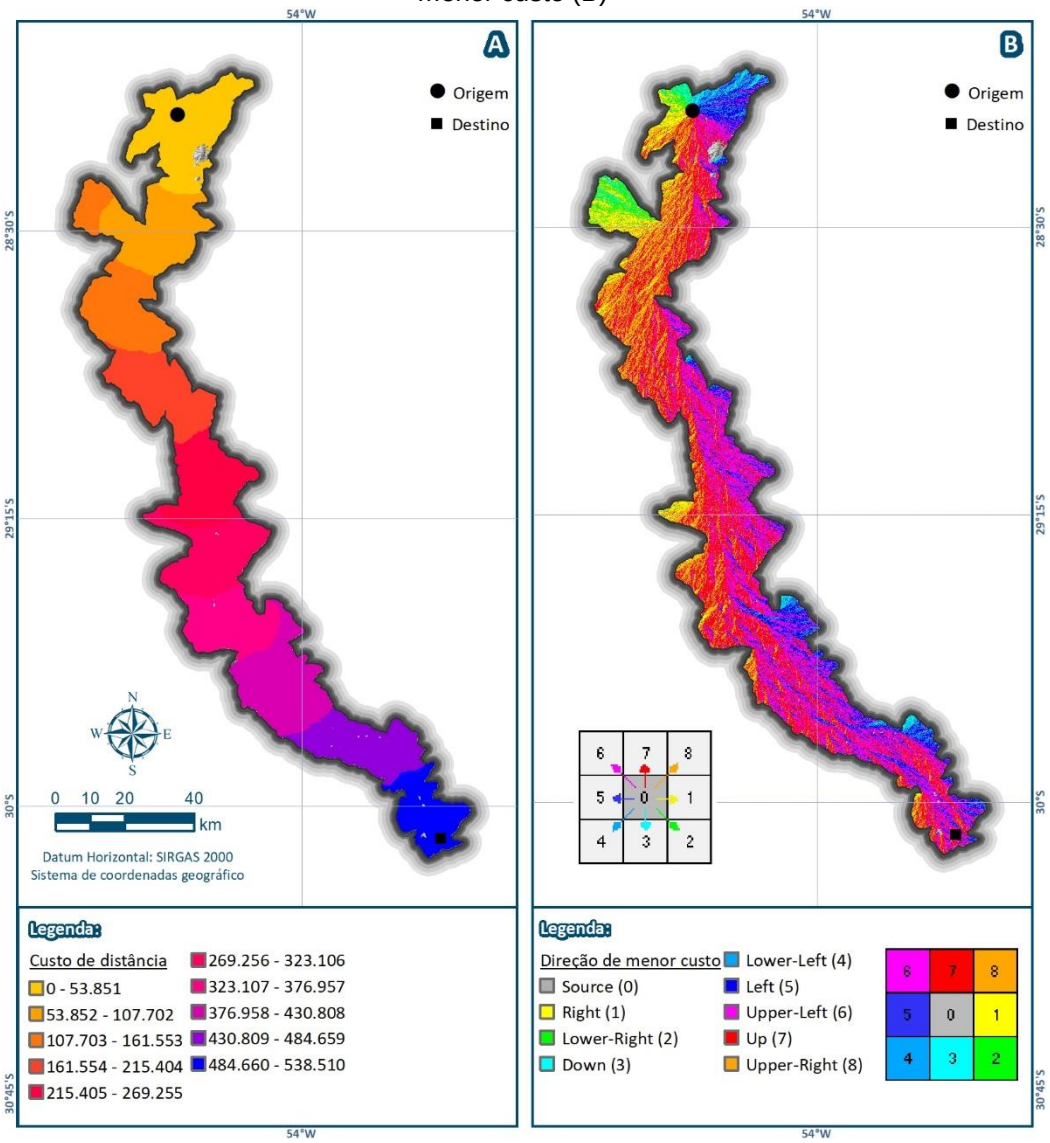
Assim, o processo para determinação da Superfície de Custo Acumulado, conforme os processamentos descritos por ESRI (2007), consiste em determinar a superfície de menor distância ponderada devido à resistência que se verifica ao atravessar cada célula – ferramenta *Cost Distance* –, e identificar a próxima célula ao longo do caminho de custo menos acumulativo de uma célula para alcançar sua origem de menor custo – ferramenta *Back-link* (Figura 3A).

A superfície de orientação de menor custo é uma superfície onde o valor de cada célula indica a direção da célula de menor custo cumulativo até ao destino (ESRI, 2011), neste caso o ponto final do traçado. Esta superfície toma valores entre 0 e 8,

[4] Disponível em: http://www.innovativegis.com/basis/mapanalysis/Topic22/Topic22.htm

onde o valor 0 representa o destino e cada um dos valores de 1 a 8 uma direção, conforme ilustrado na legenda da Figura 3B.

Figura 3 - Exemplo de Mapa de Superfície de custo acumulado (A) e Superfície de orientação de menor custo (B)



Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento continua pela procura das próximas células vizinhas com menor valor, sempre determinando o custo acumulado, ou seja, a soma do custo das células até a célula de destino, em que cada célula é multiplicada pela sua resolução espacial enquanto simultaneamente compensa o movimento diagonal de forma a obter o custo total pela passagem através da célula (SANTOS, 2008). Esta é uma etapa crucial para determinação de traçados otimizados, ou caminhos de menor custo.

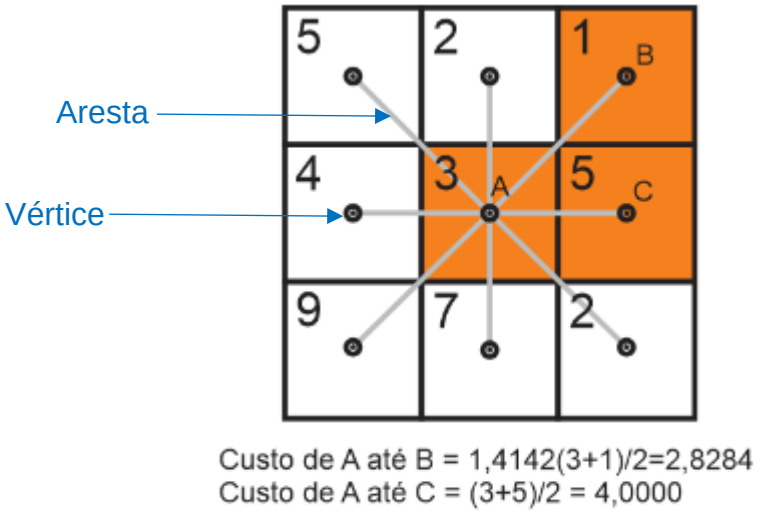
3.3.3 Caminho de mínimo custo

Existem poucos algoritmos para a determinação de caminho de mínimo custo, sendo que o mais amplamente utilizado é o algoritmo proposto por Edsger Wybe Dijkstra, que calcula o caminho de custo mínimo entre vértices de um grafo, direcionado ou não (DIJKSTRA, 1959). Por simples definição, grafo representa uma rede onde um conjunto de vértices (ou pontos) são interconectados dois a dois por arestas, que são as linhas de ligação (FEOFILOFF et al., 2011).

O algoritmo de Dijkstra, como é conhecido, soluciona o problema do caminho mais curto entre o vértice inicial e todos os demais vértices do grafo em termos do peso total das arestas, sendo que este peso total representa a soma dos pesos das arestas que compõe o caminho. Nele é utilizado um procedimento iterativo, determinando na iteração 1, o vértice mais próximo do vértice 1, na segunda iteração, o segundo vértice mais próximo do vértice 1, e assim sucessivamente, até que em alguma iteração o vértice destino seja atingido. O algoritmo permite a execução de grafos com pesos em suas arestas determinando “graus de dificuldade” em se transpor uma delas (SILVA et al., 2010).

Nas plataformas SIG a implementação deste algoritmo ocorre através de ferramentas denominadas “*least cost path*” e é feita considerando os centroides de cada célula da superfície de custo como um vértice do grafo e as arestas são as conexões entre os pixels vizinhos. Assim, cada pixel é interligado pelas arestas aos seus oito vizinhos. O comprimento de cada aresta é dado então pela média entre o valor de custo entre dois pixels vizinhos transversais. Para vizinhos diagonais o valor da média é multiplicado pelo valor correspondente a raiz quadrada de dois, compensando a maior distância diagonal, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 - Exemplo de vizinhança entre pixels e cálculo de comprimento das arestas



Fonte: Adaptado de Lima (2015).

O algoritmo de Dijkstra é utiliza uma superfície de custo acumulado, que representa a árvore de valores mínimos no algoritmo e, a partir desse resultado, o algoritmo constrói o caminho de menor custo partindo do ponto inicial do traçado, sempre procurando o pixel vizinho com menor valor de custo acumulado.

4 METODOLOGIA

A metodologia empregada consiste, essencialmente, na utilização de um conjunto de ferramentas do software ArcMap 10.5 (versão de teste) para simulação de alternativas de traçado de menor custo (*least cost path*), compreendido neste trabalho como Traçado otimizado, ou ainda, traçado de menor potencial de impacto ambiental.

Esse conjunto de ferramentas utiliza como base uma superfície de custo gerada a partir da integração de diversas subsuperfícies relativas às feições espacializadas em formato *raster*, representadas pelos mapas temáticos dos critérios (ou ainda, mapas de fatores) pré-estabelecidos com seus respectivos pesos absolutos para as classes que designam características que podem ser afetadas pela implantação do empreendimento. Esta integração é realizada através da técnica de álgebra de mapas, na qual a importância de cada mapa temático é ponderada de acordo com o peso relativo atribuído pelos avaliadores a cada critério a partir da aplicação do método AHP.

4.1 Definição da Área de Estudo: caso da Rodovia BR-392

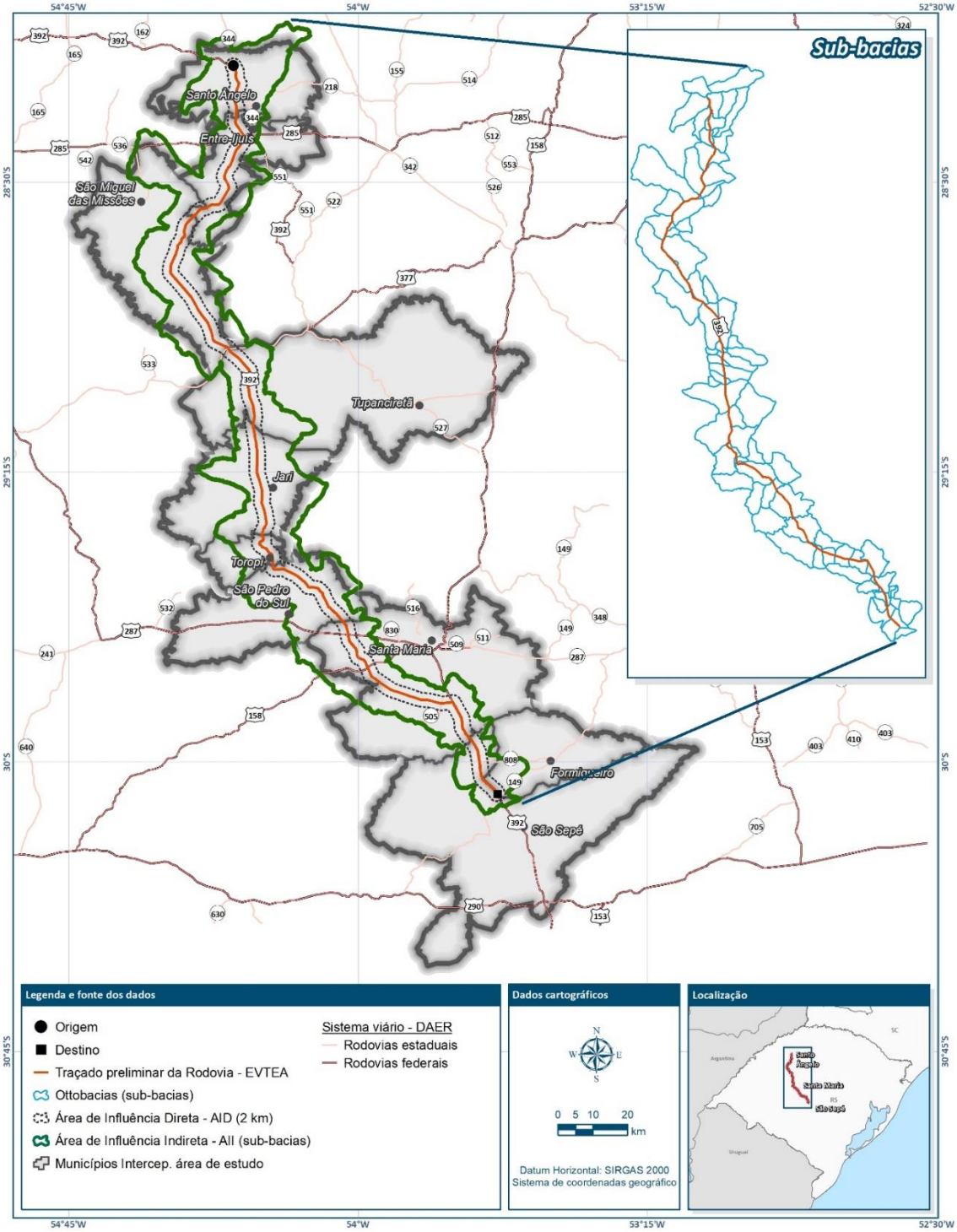
A Rodovia BR-392 integra a malha viária do RS desde o porto de Rio Grande até o município de Porto Xavier. O trecho previsto para implantação da Rodovia compreende a descontinuidade da BR-392 entre os municípios de Santo Ângelo e Santa Maria/RS, incluindo o segmento existente da Rodovia entre Santa Maria e o município de Formigueiro/RS. Deste modo, a AE considerou a ligação entre Santo Ângelo e Formigueiro/RS.

Para a definição da AE, inicialmente considerou-se uma Área de Influência Indireta (AII) em relação ao traçado preliminarmente previsto para implantação da Rodovia a partir do EVTEA, a qual corresponde a abrangência espacial das sub-bacias hidrográficas interseccionadas por uma faixa marginal de 100m para cada lado do traçado. Estas sub-bacias foram obtidas a partir das áreas de contribuição dos trechos da rede hidrográfica codificadas segundo o método de Otto Pfafstetter para classificação de bacias, denominadas de Ottobacias (sub-bacias hidrográficas regionais). Este método é adotado pela Agência Nacional de Águas (ANA), com

escala base de 1:1.000.000, utilizando dados relativos aos principais rios, malhas hidrográficas e modelo digital de elevação.

A partir desta AE, delimitou-se uma faixa linear de 2 km para cada lado do Traçado preliminar da Rodovia, de modo a se estabelecer uma Área de Influência Direta (AID) do traçado com a maior abrangência possível que não ultrapassasse o limite das sub-bacias. Na Figura 5 é apresentada a localização das áreas consideradas para a realização do presente estudo.

Figura 5 - Mapa de Localização da Área de Estudo (AE)



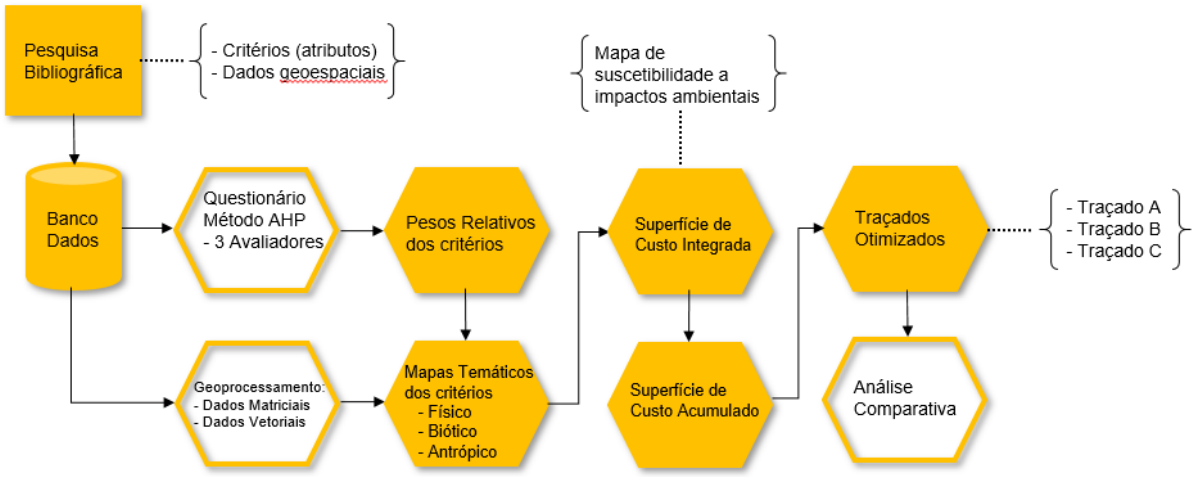
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Etapas da Metodologia Aplicada

Conforme apresentado no item anterior, a pesquisa foi desenvolvida baseada na AE proposta para a implantação da Rodovia Federal BR-392, que ligará os municípios de Santo Ângelo a Formigueiro/RS. A metodologia adotada para execução

deste trabalho foi composta pelas etapas ilustradas no fluxograma da Figura 6 e na descrição apresentada na sequência.

Figura 6 - Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Levantamento bibliográfico

Foi realizado o levantamento bibliográfico de estudos e empreendimentos de obras lineares (cases) tais como minerodutos (LACERDA, 2011), rodovias/estradas (WEBER et al, 1998; GARCIA, 2011), ferrovias (ALBUQUERQUE, 2015) e linhas de transmissão (LIMA, 2015) em que foram aplicadas ferramentas de SIG associadas à análise multicritério para a modelagem de caminhos de mínimo custo para empreendimentos de infraestrutura linear.

Para a obtenção de caminhos de mínimo custo, definido neste estudo como o Traçados otimizados para a implantação da Rodovia em termos de minimização de impactos ambientais potenciais, consideraram-se diferentes fatores físicos, bióticos e antrópicos capazes de serem representados através de mapas temáticos.

O conhecimento dos principais aspectos relevantes da área estudada baseou-se no EVTEA realizado para o empreendimento proposto (DNIT/STE, 2013), e também no material técnico produzido para o EIA-RIMA ainda em elaboração, desenvolvido pela empresa consultora do estudo.

4.2.2 Definição dos critérios utilizados na metodologia

Os fatores ou critérios utilizados na avaliação relativa aos meios físico, biótico e antrópico foram definidos em função das suas características de favorabilidade ou restritividade quanto à capacidade de exercerem influência na modelagem de alternativas de traçado mais adequadas para implantação da Rodovia, considerando-se uma avaliação quanto à suscetibilidade a impactos ambientais potenciais.

A escolha dos critérios se deu em razão da sua relevância na dinâmica de implantação rodoviária, bem como na disponibilidade de base de dados compreendida nos limites da AE definida. Dentre os critérios definidos, alguns possuem caráter mais facilmente mensurável enquanto outros são mais subjetivos. Estes representam, ainda que indiretamente, os aspectos ambientais dos quais possam se originar impactos ambientais.

Inicialmente foram considerados 18 critérios com possibilidade de espacialização das informações. No entanto, os critérios Terras indígenas, Quilombolas, Sítios arqueológicos e Unidades de Conservação (UC) foram retirados da análise, pois o limite da AE considerada neste estudo não abrangeu estas feições, visto que foi definida em razão do Traçado preliminar. Ainda, não se considerou relevante a utilização do critério Litologia, pois as formações litológicas mapeadas na AE estão intrinsicamente relacionadas com os tipos de solos formados, de maneira que a utilização das informações litológicas, sob este ponto de vista, não agregaria positivamente ao estudo e, do contrário, apenas aumentaria o tempo de processamento dos dados. Também se optou por desconsiderar o critério Interferência em águas subterrâneas, visto que as faixas de variação em relação à altura do lençol freático observada nos dados disponibilizados não satisfaziam as premissas para diferenciação de acordo com classes, fato este que também não acrescentaria nenhuma mudança significativa aos resultados.

Deste modo, definiram-se os seguintes critérios para aplicação da metodologia: Declividade, Tipo de solos, Hidrografia e Potencial erosivo dos solos (Meio Físico); Tipo de vegetação, Áreas de preservação permanente, Áreas prioritárias para a conservação biológica e (Meio Biótico); Uso e cobertura do solo, Aproveitamento mineral, Vias existentes e Interferência em ferrovias (Meio Antrópico). A seguir é realizada uma breve descrição destes critérios.

4.2.3 Obtenção da base de dados geoespacializados da área de estudo

Para a obtenção das feições referentes à declividade do terreno e potencial erosivo utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) do projeto TOPODATA do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), gerado a partir do processamento digital do MDE do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*)[1]. Os dados disponíveis do TOPODATA estão representados no formato *raster* com tamanho de pixel de 30m x 30m. Estes dados foram corrigidos, incluindo informações em pontos/áreas anteriormente com ausência de dados e passaram por um processamento computacional para refinamento no tamanho da célula (pixel) para aproximadamente 30m. O refinamento foi realizado a partir de interpolação de dados pelo método de krigagem, processo embasado na análise geoestatística da variabilidade dos dados, onde se definem coeficientes que respondem melhor distribuição aleatória de observações VALERIANO, 2008). Para elaboração do uso e cobertura do solo foram utilizadas imagens do satélite LANDSAT 8.

Para as demais feições que compõem este estudo foram utilizadas as bases de dados geoespaciais disponibilizadas por diversos órgãos governamentais, tais como Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Ministério do Meio Ambiente (MMA), Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), dentre outros. No no Quadro 3 a seguir são apresentadas as informações referentes aos critérios utilizados no estudo.

Quadro 3 - Descrição do banco de dados utilizado no estudo

Classificação do Meio	**Critério**	**Breve descrição**	**Formato primário**
Físico	Declividade	Classes de declividade	vector/vetorial
	Tipo de solo	Classificação das unidades de solos	vector/vetorial
	Interferência em águas superficiais	Sistema Hidrográfico (cursos d'água intermitentes, perenes e perenes principais das sub-bacias)	vector/vetorial
	Potencial erosivo dos solos	Classes de potencial erosivo baseado na RUSLE	raster/matricial
Biótico	Fitofisionomias	Fitofisionomias vegetais	vector/vetorial
	Área de Preservação Permanente	APP geradas apenas para hidrografia	vector/vetorial
	Áreas Prioritárias para Conservação Biológica	Áreas prioritárias para a conservação dos biomas brasileiros	vector/vetorial

[1] Missão espacial liderada pela NASA e NIMA (*National Imagery e Maping Agency*) com parcerias com agências espaciais da Alemanha (DLR) e Itália (ASI), realizada entre 11 a 22 de fevereiro de 2000 visando gerar um modelo digital de elevação de 80% do Globo terrestre.

Classificação do Meio	Critério	Breve descrição	Formato primário
Antrópico	Uso e cobertura dos solos	Classificação do Uso e cobertura do Solo da AE	raster/matricial
	Aproveitamento minerário	Requerimento minerário DNPM	vector/vetorial
	Vias existentes	Rede viária do RS	vector/vetorial
	Interferência em ferrovia	Vias ferroviárias	vector/vetorial

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cabe atentar para o fato de que a qualidade da modelagem apresentada neste estudo está condicionada ao MDE e imagens de satélite, bem como à escala de mapeamento das feições vetoriais disponíveis e utilizadas, sendo que estas bases cartográficas podem ser atualmente obtidas a partir de imagens de satélite com melhor resolução ou até mesmo por técnicas de aerofotogrametria com aeronaves remotamente pilotadas – RPAS (sigla de *remotely piloted aircraft systems*), possibilitando a geração de imagens de altíssima resolução (inferior a 1m), o que proporcionaria uma grande redução das incertezas espaciais.

4.2.4 Pesos absolutos das classes dos critérios

Os critérios escolhidos foram avaliados de acordo com classes (níveis) e valorados[2] com pesos baseados na escala de importância apresentada no método AHP proposto por Saaty (1991). A definição destes pesos absolutos (assim denominados no estudo) é uma das principais etapas a ser realizada para a aplicação do modelo. Para tanto, os pesos das classes de cada critério foram atribuídos através de procedimentos heurísticos, apoiados no conhecimento das características que descrevem os critérios conforme estudos semelhantes abordados no item 3.3. A definição heurística dos pesos tem como fator determinante a experiência pessoal, sendo que continua sendo amplamente aceita como base para sistemas especialistas, de modo particular em situações onde a teoria e os modelos empíricos de comportamento dos dados não estão bem estabelecidos.

Deste modo, os pesos absolutos variam de 1 a 9 para as classes que compõem cada critério. O Peso de valor igual a 1 representa a menor importância, pois reflete uma menor suscetibilidade à ocorrência de impacto ambiental e, portanto, mais

[2] Atribuição de valor a uma característica, fator ou atributo que expressa qualidade.

favorável à passagem da Rodovia. Já o valor igual a 9 representa maior importância, conferindo a condição menos favorável, ou seja, uma maior suscetibilidade à ocorrência de impacto devido à passagem do traçado da Rodovia.

Para efeito de exemplo, cita-se o critério Declividade, no qual porções de relevo caracterizado como plano (declividade inferior a 3%) foram valoradas com peso 1, enquanto que áreas de relevo montanhoso ou escarpado (declividades superiores 45%) foram valoradas com peso 9. No Apêndice A constam todos os pesos absolutos estabelecidos para as classes dos critérios.

4.2.5 Descrição dos critérios utilizados

Declividade

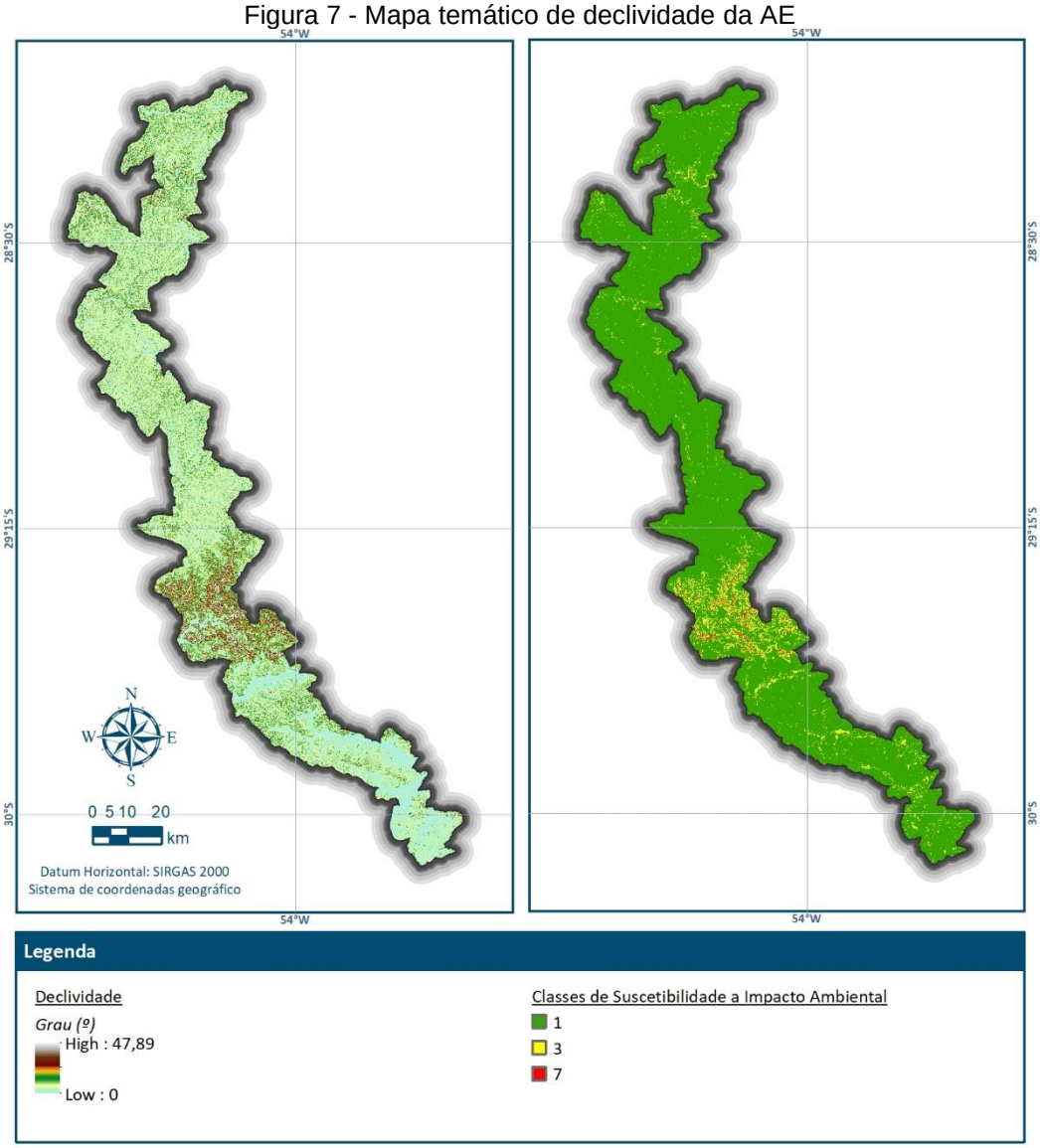
A declividade é a inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal, ou seja, consiste na relação existente entre o desnível topográfico entre dois pontos e a distância horizontal entre esses pontos.

A declividade do terreno é uma variável básica para a segmentação de áreas em praticamente todos os procedimentos no planejamento territorial, por apresentar estreita associação com processos de escoamento superficial das águas pluviais, erosão e os potenciais impactos decorrentes. O cálculo da declividade depende do intervalo de medidas, sendo que seu resultado deve ser considerado como uma estimativa, ou seja, “o cálculo de declividade será sempre o resultado de um diferencial altimétrico entre vizinhos e, portanto, dependente da distância considerada” (VALERIANO, 2008, p. 26).

Em relação a potenciais impactos ambientais, a declividade do terreno implica em condições mais ou menos favoráveis ou até inviáveis à implantação de um empreendimento rodoviário. Isto porque em terrenos com inclinação muito acentuada, por exemplo, há uma maior propensão à ocorrência de processos erosivos e movimentos de massa. Há de se considerar também que terrenos mais declivosos implicarão em cortes e aterro, fato este que ocasiona a geração de bota-fora (material inservível a ser descartado) e também a necessidade de maiores volumes de material mineral extraído de jazidas para compor o corpo de aterro, o que, além dos impactos referentes ao meio físico, também impacta demasiadamente nos custos monetários do empreendimento.

Por outro lado ainda, áreas com topografia plana onde a declividade é muito próxima a zero estão mais propensas a ocorrências de inundações, e a construção da rodovia, neste caso, pode influenciar na dinâmica hídrica de uma região. Na Figura 7 visualiza-se o mapa temático de declividade da AE.

Figura 7 - Mapa temático de declividade da AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tipo de Solo

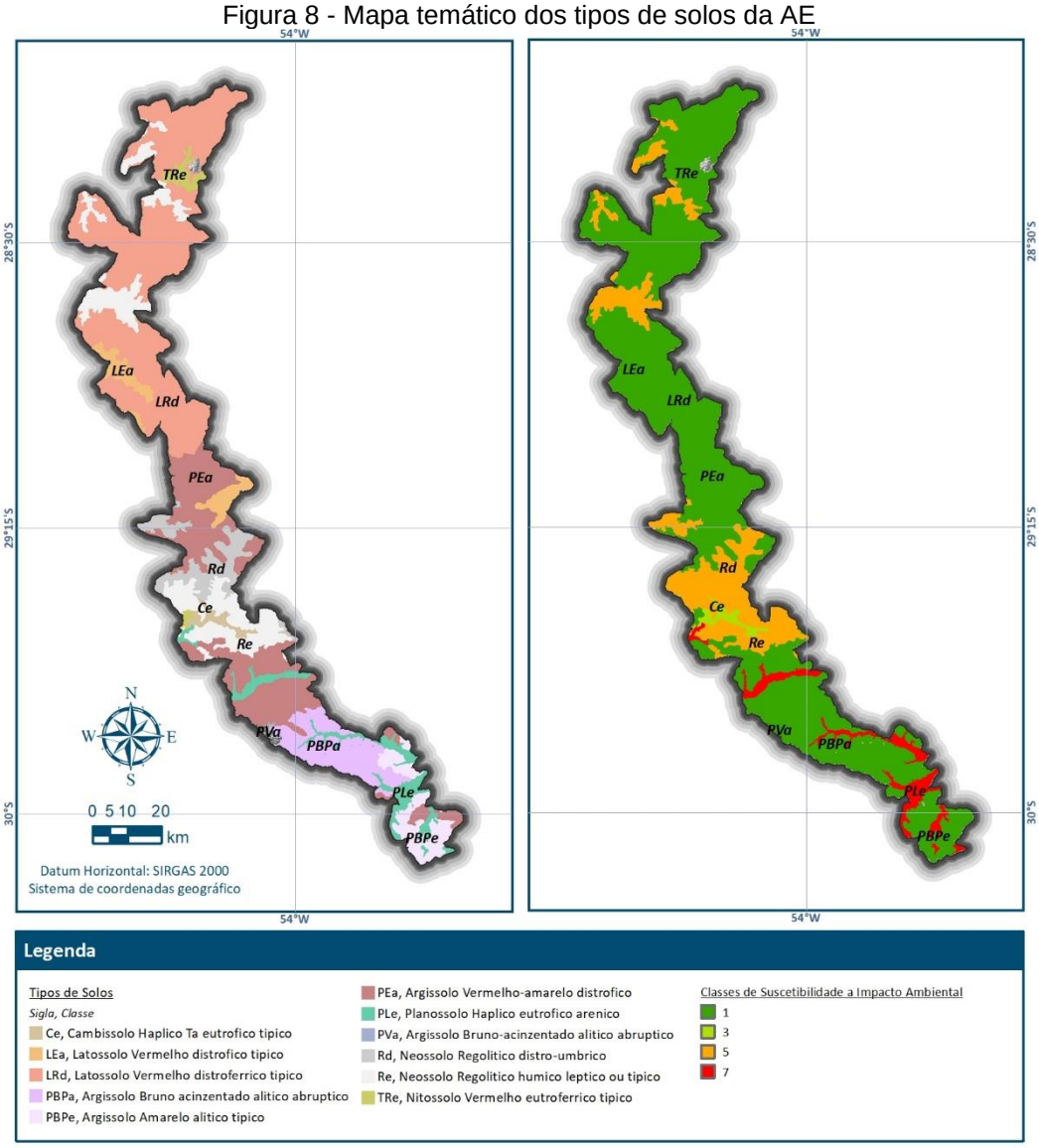
O mapeamento e localização das diferentes classes de solo de determinada região, bem como o conhecimento das propriedades e características de cada tipologia, forma a base para o planejamento do uso das terras, e possibilita evitar ou minimizar impactos ambientais. Neste contexto, na AE destacam-se as classes: Latossolo, Argissolo, Cambissolo, Neossolo e Planossolo.

Como subsídio para as definições utilizadas neste trabalho, adotou-se como referência para a classificação dos solos a suscetibilidade a impactos ambientais das diferentes classes mapeadas na AE, a partir da adaptação da metodologia de Kämpf *et al.* (2008), a qual avalia a capacidade de resistência dos solos a impactos ambientais decorrentes da disposição final de resíduos.

Para tanto, considera-se tanto mais suscetível a impacto ambiental quanto menos resistente for este solo aos impactos possíveis. Estes fatores de resistência a impactos dos solos estão relacionados às características destes como profundidade, textura, mineralogia, gradiente textural, drenagem natural, pedregosidade dentre outros.

Também, assim como a declividade, o tipo de solo por onde passará o traçado da rodovia implicará nas decisões técnicas de projeto, uma vez que, caso a rodovia seja construída sobre solos moles (com menor capacidade de suporte de carga), por exemplo, haverá a necessidade de troca deste material por outro mais nobre oriundo de jazida, gerando a necessidade de disposição do material escavado em bota-fora, sendo que ainda deverá ser considerada a necessidade de construção de superestruturas que poderão resultar no aumento dos custos do projeto. Na Figura 8 é apresentado o mapa temático dos solos da AE.

Figura 8 - Mapa temático dos tipos de solos da AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

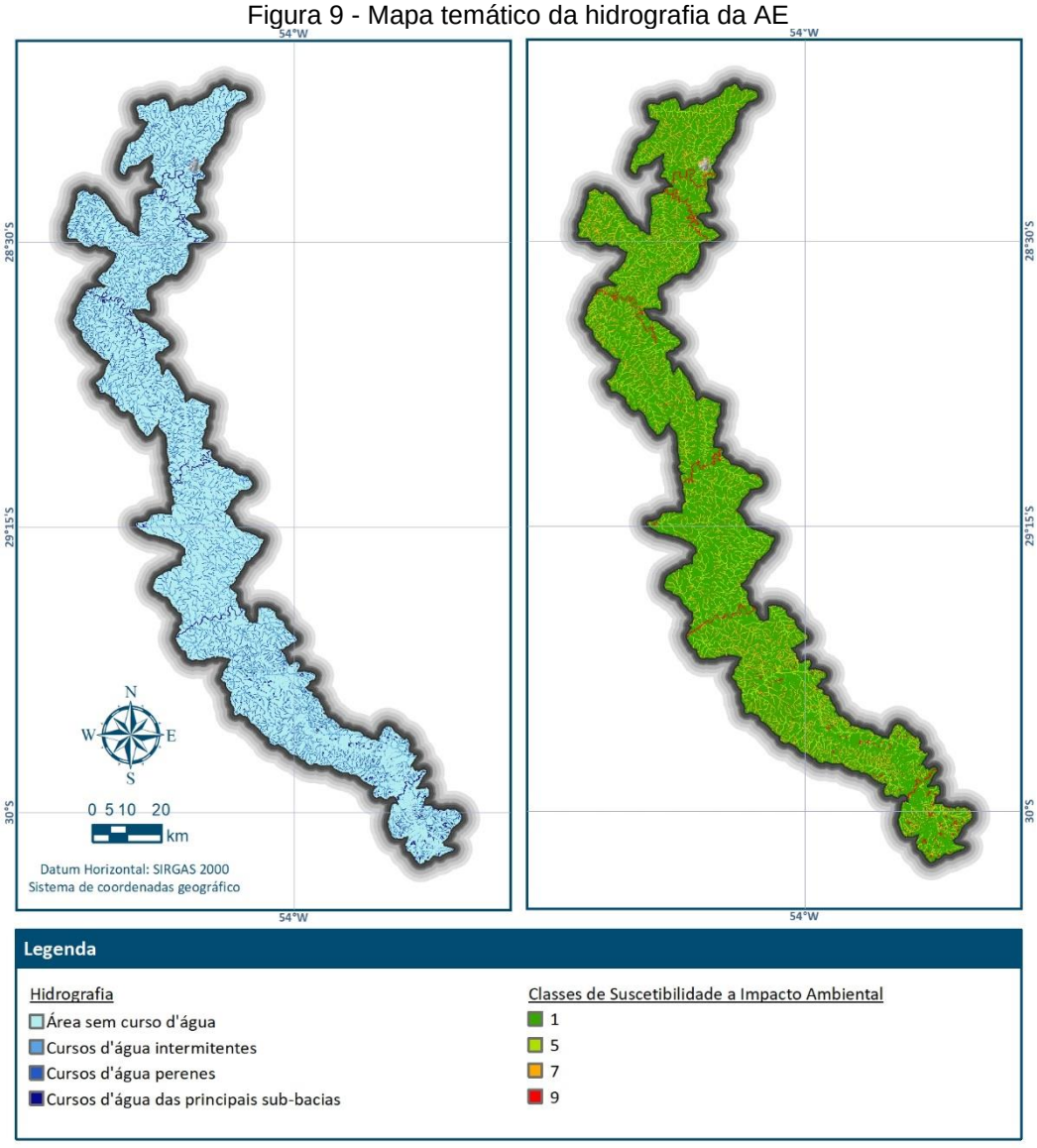
Interferência em Águas Superficiais

A interceptação dos recursos hídricos de uma região configura-se como um dos principais aspectos com elevado potencial de ocasionar impactos negativos em relação à qualidade das águas superficiais. Além da influência direta nos processos de dinâmica superficial como instabilidade de encostas e taludes, formação de erosões e o consequente carreamento da fração fina do solo para drenagens e sistemas hídricos locais (impacto propriamente dito), podem ocorrer também contaminações decorrentes do despejo de esgoto sanitário ou derramamento de produtos químicos contendo hidrocarbonetos, por exemplo. Como efeito, tem-se a alteração dos padrões de qualidade dos recursos hídricos locais, gerando um cenário

de degradação que pode comprometer a dinâmica natural dos ecossistemas aquáticos (PEREIRA et al, 2015).

Outro fator que está implícito é que quanto maior a quantidade de cursos d'água interceptados pela rodovia e maior for a largura destes, tanto maior será a necessidade de serem construídas estruturas de transposição como obras de arte especiais (pontes) ou obras de arte correntes (bueiros, galerias), as quais podem aumentar significativamente os custos monetários do empreendimento. Deste modo, considera-se para a AE que tanto menor será a favorabilidade a passagem do traçado da Rodovia quanto maior for a largura do corpo hídrico. Na Figura 9 é apresentado o mapa temático da hidrografia presente na AE.

Figura 9 - Mapa temático da hidrografia da AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Potencial Erosivo dos Solos

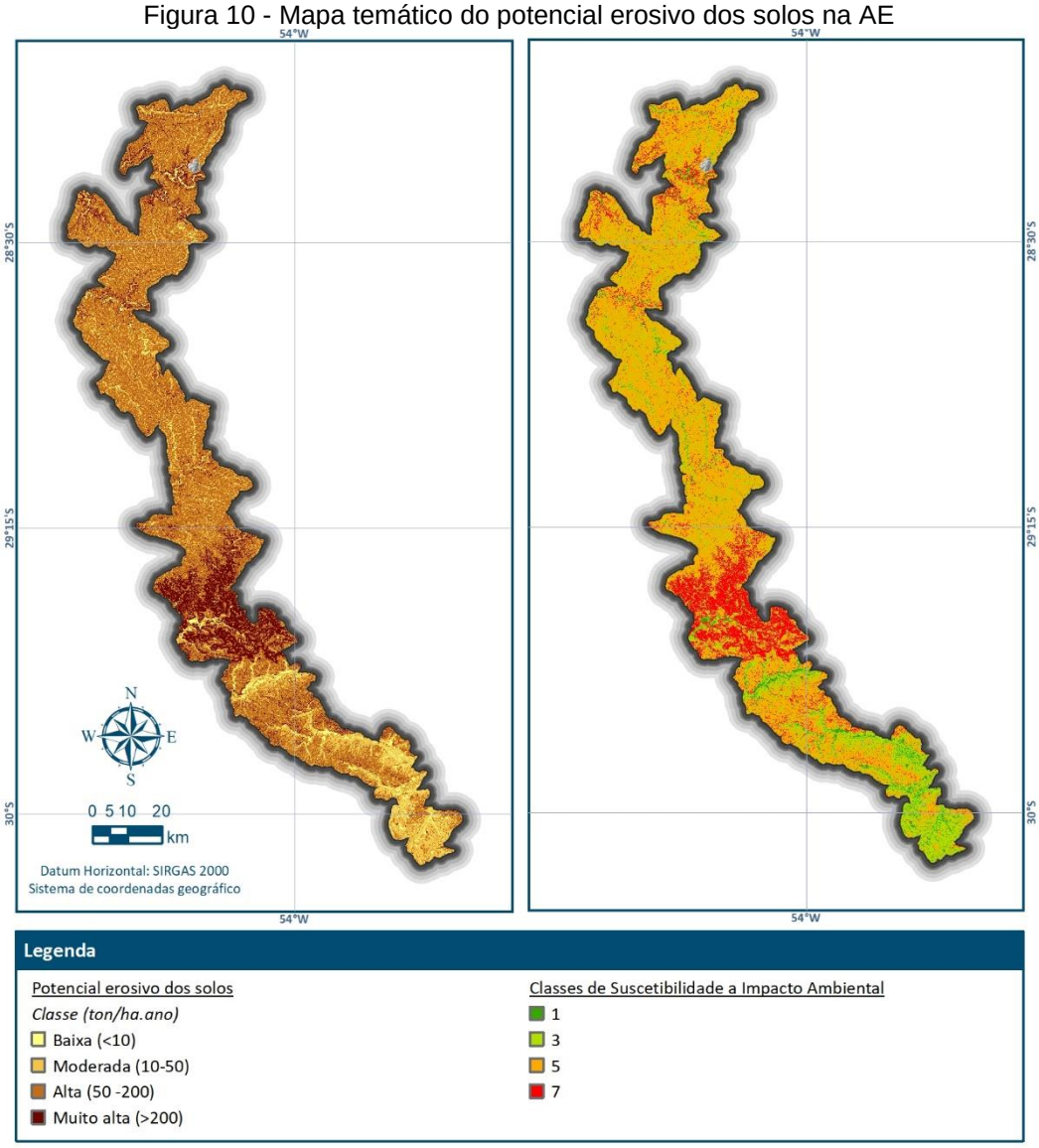
A produção de sedimentos ocasionada pela formação de processo erosivo advindo da retirada da cobertura vegetal e mobilização do solo bem como o carreamento destes sedimentos até os cursos d'água, incluindo distúrbios das margens de arroios e rios para a instalação de obras de arte, talvez seja o impacto ambiental mais provável de ser observado numa obra de implantação rodoviária.

Com base no exposto, o conhecimento das áreas mais suscetíveis à ocorrência de erosão torna-se imprescindível para a previsão de medidas que deverão ser adotadas com a construção da rodovia. Nesse sentido, destacam-se na literatura técnica os estudos referentes à estimativa da erosão dos solos através do uso de modelos matemáticos, dentre os quais, a Equação Universal de Perdas de Solo (do inglês *Universal Soil Loss Equation* – USLE) é, sem dúvida, o modelo mais aplicado no mundo (GARCÍA RUIZ et al, 2015).

A USLE consiste num modelo destinado a calcular a perda de solo proveniente de erosão laminar e por sulcos, não prevendo deposição, nem computando produção de sedimento por ravina e erosão das margens e fundo de canal. É constituída por fatores naturais de erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, geometria da encosta afetada, e por fatores influenciados diretamente pelo homem como uso, manejo e práticas conservacionistas (WISCHMEIER e SMITH, 1978).

Para a elaboração do mapa de potencial erosivo dos solos na AE foi aplicada a RUSLE (versão revisada da USLE), conforme detalhamento do método apresentado no Apêndice B. Ressalta-se que, como este estudo buscou identificar a suscetibilidade natural à erosão, os fatores relativos à ação antrópica (uso e cobertura do solo, e práticas conservacionistas do solo) não foram considerados. Na Figura 10 é apresentado o mapa temático do potencial erosivo dos solos na AE.

Figura 10 - Mapa temático do potencial erosivo dos solos na AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tipo de Vegetação

A AE abrange três fitofisionomias, a saber: Estepe, Floresta Estacional Decidual e Contato Savana/Estepe (Figura 11). A fitofisionomia denominada Estepe designa formações predominantemente campestres existentes nas zonas temperadas, onde se registram precipitações pluviométricas durante todo o ano (IBGE, 2004). Os estepes do Rio Grande do Sul caracterizam-se pela inserção em área subtropical, onde as espécies são submetidas a uma dupla estacionalidade. Na sua imensa maioria, a Estepe compreende uma formação gramíneo-lenhosa típica, destituída de aglomerados arbustivo-arbóreo significativos. A maior parte destas áreas encontra-se antropizada.

Na fitofisionomia que corresponde a Floresta Estacional decidual a floresta é tipicamente ombrófila, sem período seco e com bastante intensidade e regularidade pluviométricas. A ausência de algumas espécies perenifoliadas põe em evidência o caráter estacional desta região, manifestado pela quase integral decidualidade da cobertura superior da floresta. Esta queda foliar, tão significativa durante a estação mais fria do ano, faz parte de um processo de hibernação, provavelmente acionado por meio de reações hormonais.

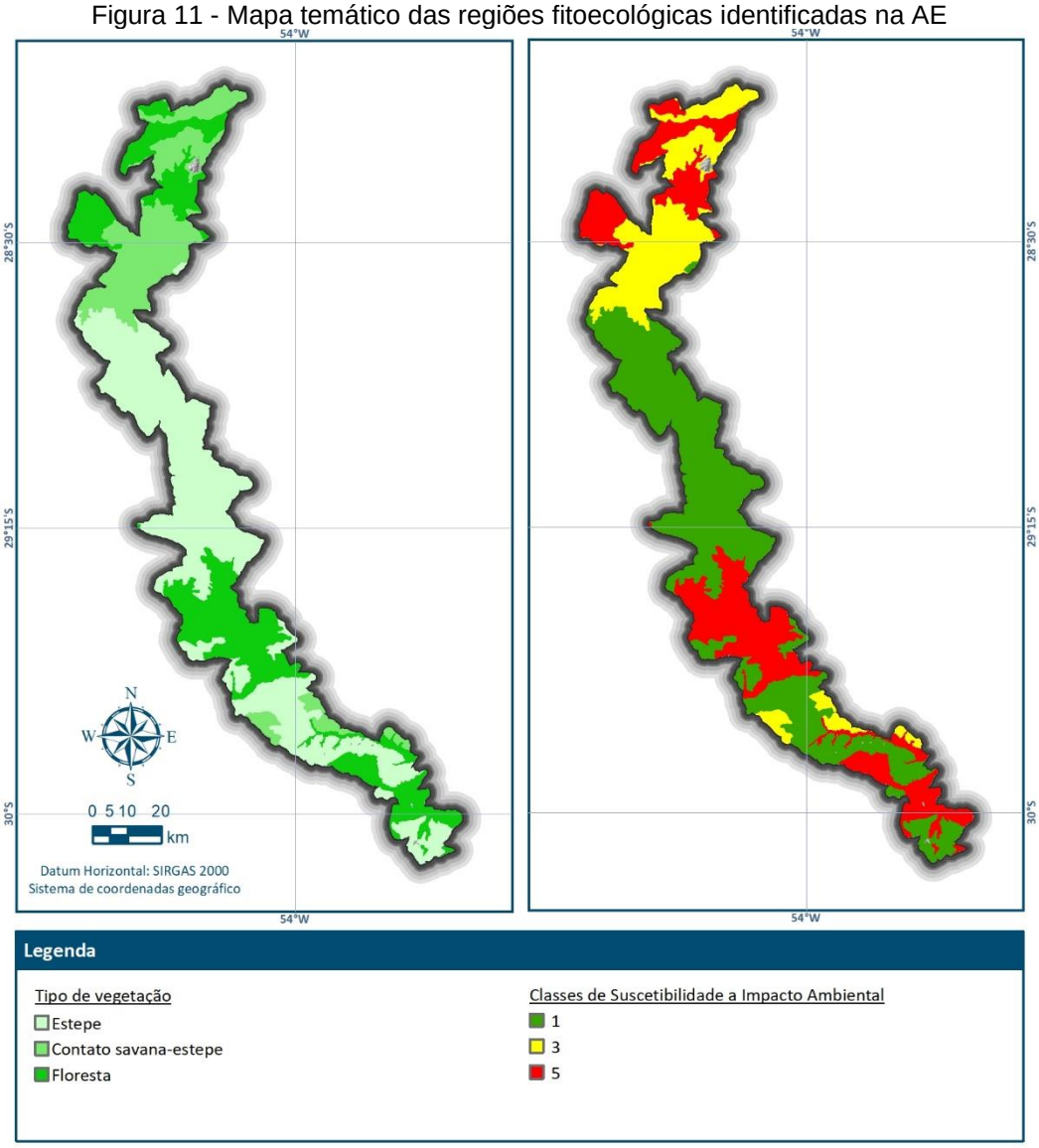
As diversas regiões fitogeográficas nem sempre apresentam nítida individualização. De modo geral, há uma gradual mudança fitofisionômica e florística evidenciada pelos diversos tipos de encraves e ecótonos (misturas) que caracterizam as faixas de contato inter-regionais.

Segundo Leite e Klein (1990), em relação à fitofisionomia contato savana/estepe, de modo geral, distinguem-se na região as formações Savana Estépica Arbórea Aberta, Parque e Gramíneo-Lenhosa. Estas formações identificam-se pelas características comuns do tapete graminoso. As diferenciações ficam por conta, principalmente, da estrutura da vegetação lenhosa (arbórea-arbustiva-subarbustiva).

Assim, em toda a sua extensão, o estrato rasteiro da Savana Estépica compõem-se, predominantemente, de espécies dos gêneros: Stipa, Andropogon, Aristida e Erianthus, além de outros, associados às gramíneas rizomatosas, principalmente, do gênero Paspalum e as plantas das famílias de leguminosas, umbelíferas, verbenáceas, oxalidáceas etc. Convém ressaltar a importância e a fragilidade do tapete graminoso como elemento protetor dos solos da região. Outra característica comum a estes campos é a acentuada tomentosidade da cobertura gramíneo-lenhosa, devida, principalmente, à grama-forquilha (*Paspalum nonatum*), que empresta à paisagem uma coloração acinzentada.

Segundo os mesmos autores, é importante para a caracterização da região a ocorrência de agrupamentos de cactáceas, principalmente dos gêneros Cereus (mandacaru) e Opuntia, coroa-de-frade (*Melocactus spp*.) em geral associados aos afloramentos rochosos.

Figura 11 - Mapa temático das regiões fitoecológicas identificadas na AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Áreas de Preservação Permanente

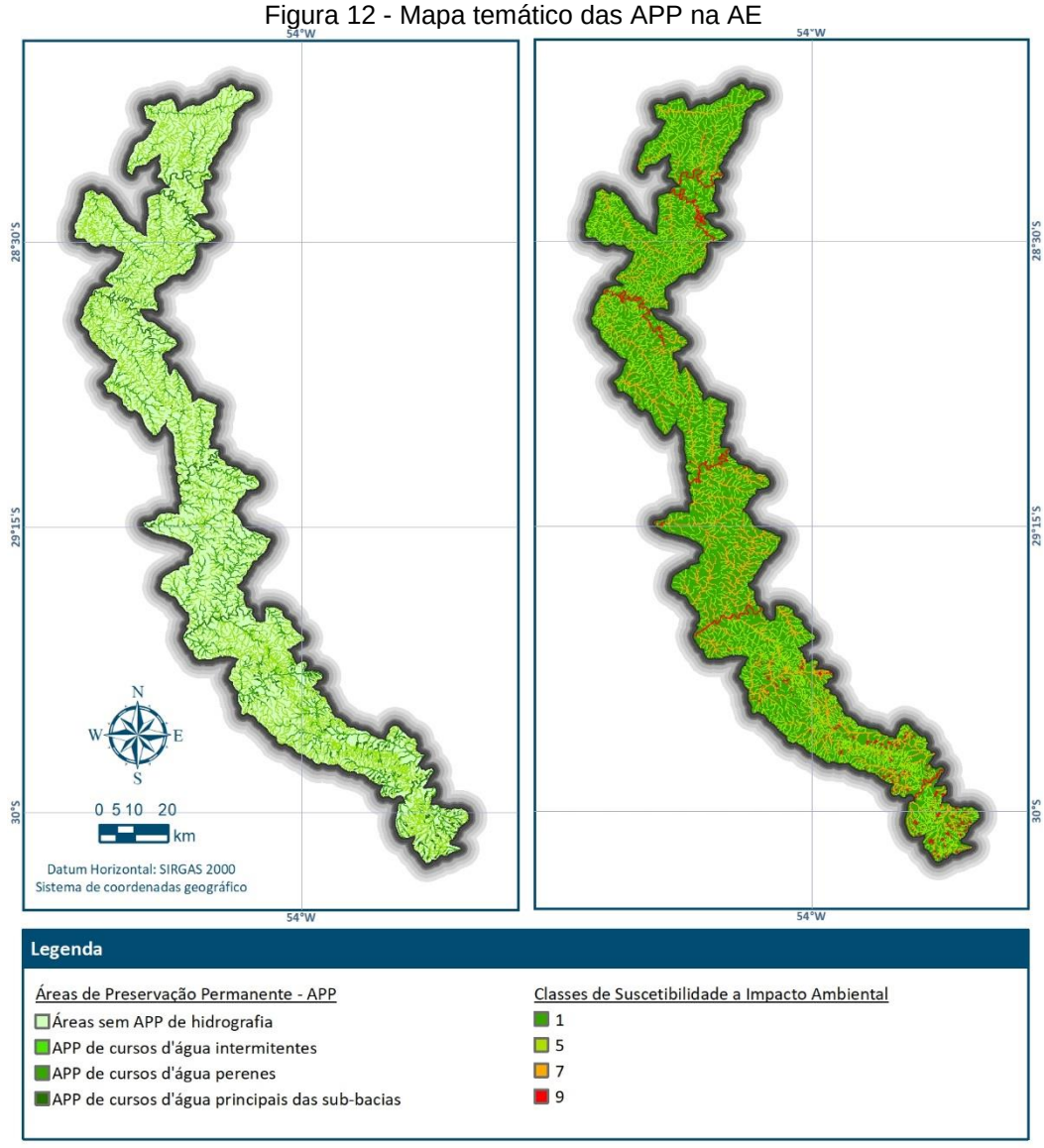
De acordo com a Lei 12.651/612 que instituiu o Código Florestal Brasileiro, área de preservação permanente (APP) corresponde a "[...] áreas cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica, a biodiversidade, o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas" (BRASIL, 2012, p. 2).

São exemplos de APP: áreas compreendidas em faixas que margeiam os Rios (vegetação ciliar); às margens de lagoas, lagos ou reservatórios de águas naturais ou artificiais; ao redor de nascentes ou olhos d'água; em topos de morros, montes, montanhas e serras; em encostas ou parte delas com declividade superior a 45º, entre outras, as quais devem ser protegidas e mantidas com vegetação natural. É permitida

a supressão da vegetação destas áreas somente com prévio licenciamento ambiental e devido à utilidade pública, caso em que se enquadram as rodovias.

Para este estudo foram consideras apenas as APP de nascentes e hidrografia devido à falta de precisão na determinação destas para as demais condições mencionadas na lei. As faixas de APP foram determinadas através de geoprocessamento, sendo considerada uma largura média de 30m dos cursos d´água para obtenção dos polígonos correspondentes as APP de hidrografia, e 50m para nascentes. Ressalta-se que se atribuiu maior suscetibilidade a impactos significativos àquelas APP dos cursos d'água principais de cada sub-bacia e também de nascentes. Na Figura 12 é apresentado o mapa temático das APP da AE.

Figura 12 - Mapa temático das APP na AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade

De acordo com o Ministério do Meio Ambiente (MMA, 2007), entre 1998 e 2000, o Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira - PROBIO/MMA realizou ampla consulta para a definição de áreas prioritárias para a conservação, uso sustentável e repartição de benefícios da biodiversidade nos Biomas.

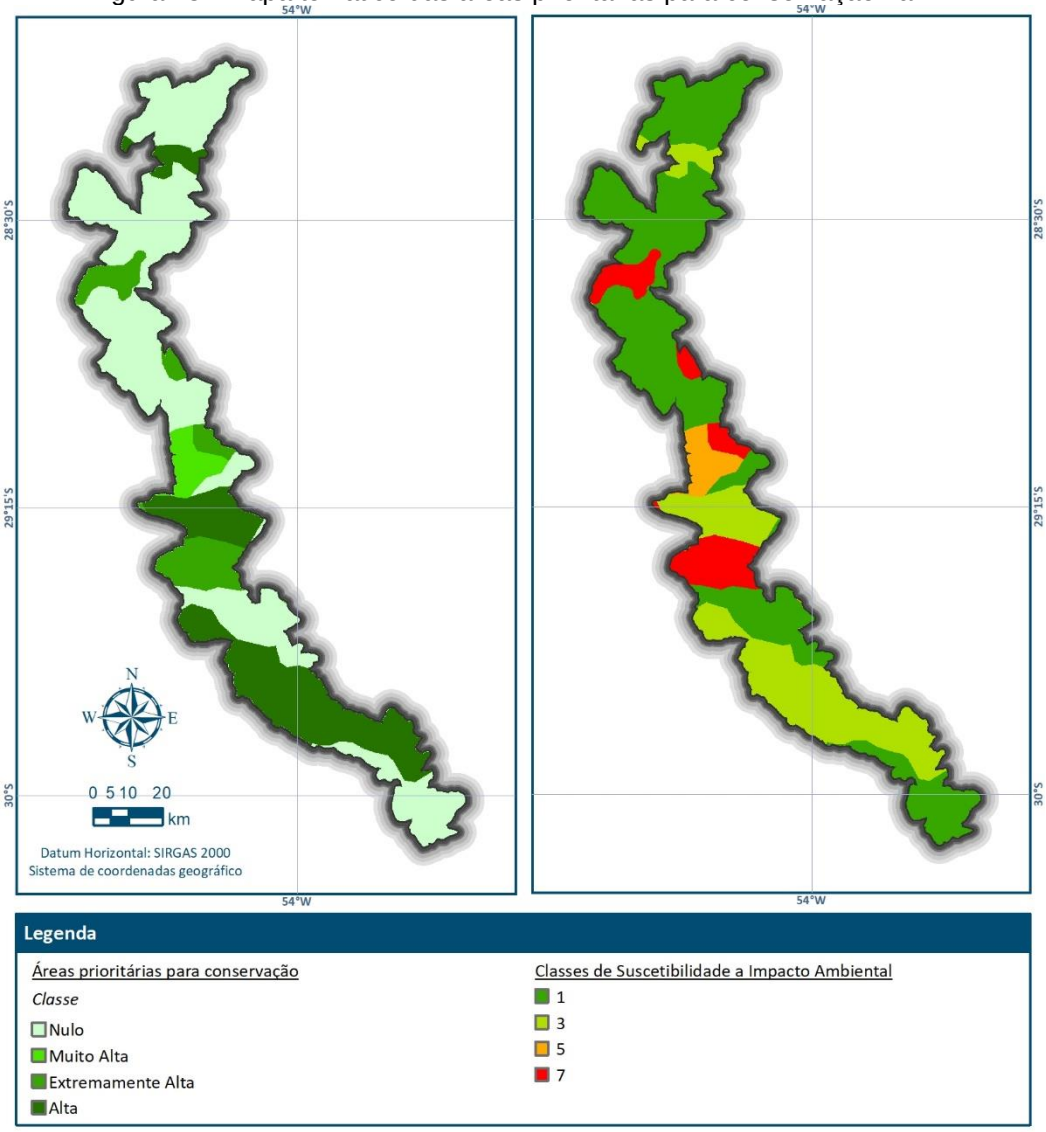
As áreas prioritárias atualizadas, instituídas pela Portaria MMA nº 09/2007, estão sendo úteis na orientação de políticas públicas e na definição de áreas para criação de novas UC, nas esferas Federal e Estadual (MMA, 2007 - Série Biodiversidade 31).

De acordo com as premissas acima descritas, foram identificadas e espacializadas as áreas prioritárias que estão localizadas na AE, cujas análises foram efetuadas de acordo com a distribuição e grau de prioridade atribuído pelo MMA. Conforme observado, existem 09 (nove) áreas prioritárias instituídas localizadas parcialmente na AE, sendo 4 (quatro) classificadas com prioridade extremamente alta, uma muito alta e 3 (três) com prioridade alta (sendo que estas tem maior abrangência na AE), no qual estão previstas quatro tipos de ações prioritárias (restaurar campos, levantamentos florísticos, criação de UC de proteção integral e valorização de atividades de pecuária extensiva de baixo impacto).

Devido a sua característica linear, a implementação de novas rodovias interfere diretamente na fragmentação territorial de ecossistemas, que por consequência, cria uma barreita ao deslocamento de espécies da fauna local, fazendo com que haja uma diminuição do fluxo gênico e aumentando a probabilidade de extinção local de inúmeras espécies (ESPERANDIO, 2014).

Para os fins aplicados neste trabalho, considerou-se que áreas com prioridade Alta representam a menor suscetibilidade à ocorrência de impactos ambientais significativos decorrentes da implantação da rodovia, enquanto que aquelas com prioridade Extremamente Alta foram consideradas como áreas de maior potencial de ocorrência de impactos negativos significativos. Na Figura 13 é apresentado o mapa temático das áreas prioritárias para conservação da diversidade na AE.

Figura 13 - Mapa temático das áreas prioritárias para conservação na AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uso e Cobertura do Solo

O uso e cobertura do solo (UCS) auxilia na tomada de decisão, garantindo sustentabilidade frente aos aspectos físicos, bióticos e socioeconômico de uma região. Portanto, entende-se como sendo um dado necessário para auxiliar no conhecimento da realidade ambiental da área a ser estudada.

Para elaboração do uso e cobertura do solo na AE foram utilizadas imagens de satélite LANDSAT 8 – sensor Operational Land Imager (OLI) –, com resolução espacial de 30m, coletadas em 2013. Através de procedimentos de análise de amostras sobre as imagens e classificação supervisionada em software de geoprocessamento, gerou-se uma classificação automática bruta. Em seguida, essa

classificação em formato *raster*, foi transformada para o formato vetorial e editada visando melhor representar a geometria de cada unidade de mapeamento.

Conforme o arquivo vetorial disponibilizado pelo Dnit através da empresa consultora responsável pela elaboração do EVTEA (DNIT/STE, 2013), a classificação supervisionada realizada resultou em 9 (nove) classes, a saber: área construída, hidrografia, cultivo, cultivo irrigado, campo e/ou pastagem, predomínio de campo e/ou pastagem, vegetação, predomínio de vegetação e silvicultura. Essas classes podem ser descritas da seguinte maneira:

• Área construída: áreas ocupadas por edificações, estradas e/ou pavimentos asfaltados;

• Hidrografia: áreas cobertas com a presença de rios, lagos, lagoas, açudes ou demais corpos hídricos;

• Cultivo: áreas utilizadas para cultivo temporário ou permanente;

• Cultivo irrigado: áreas ocupadas por cultivo irrigado artificialmente ou naturalmente, onde se incluem os sistemas de pivôs centrais de irrigação;

• Campo e/ou pastagem: nesta classe estão inclusos uso e cobertura. Uso no sentido das pastagens cultivadas e cobertura no sentido das áreas cobertas por vegetação de campo (gramíneas), predominantes no bioma no qual está inserida maior parte da AE (Pampa). Devido à similaridade entre esse uso e essa cobertura, os mesmos foram inclusos em única classe;

• Predomínio de campo e/ou pastagem: nesta classe foram delimitadas extensas áreas onde o predomínio de cobertura e/ou uso é de campo e/ou pastagem. São áreas onde os outros usos e coberturas representam áreas muito pequenas e geralmente diversificadas, dificultando a delimitação das mesmas;

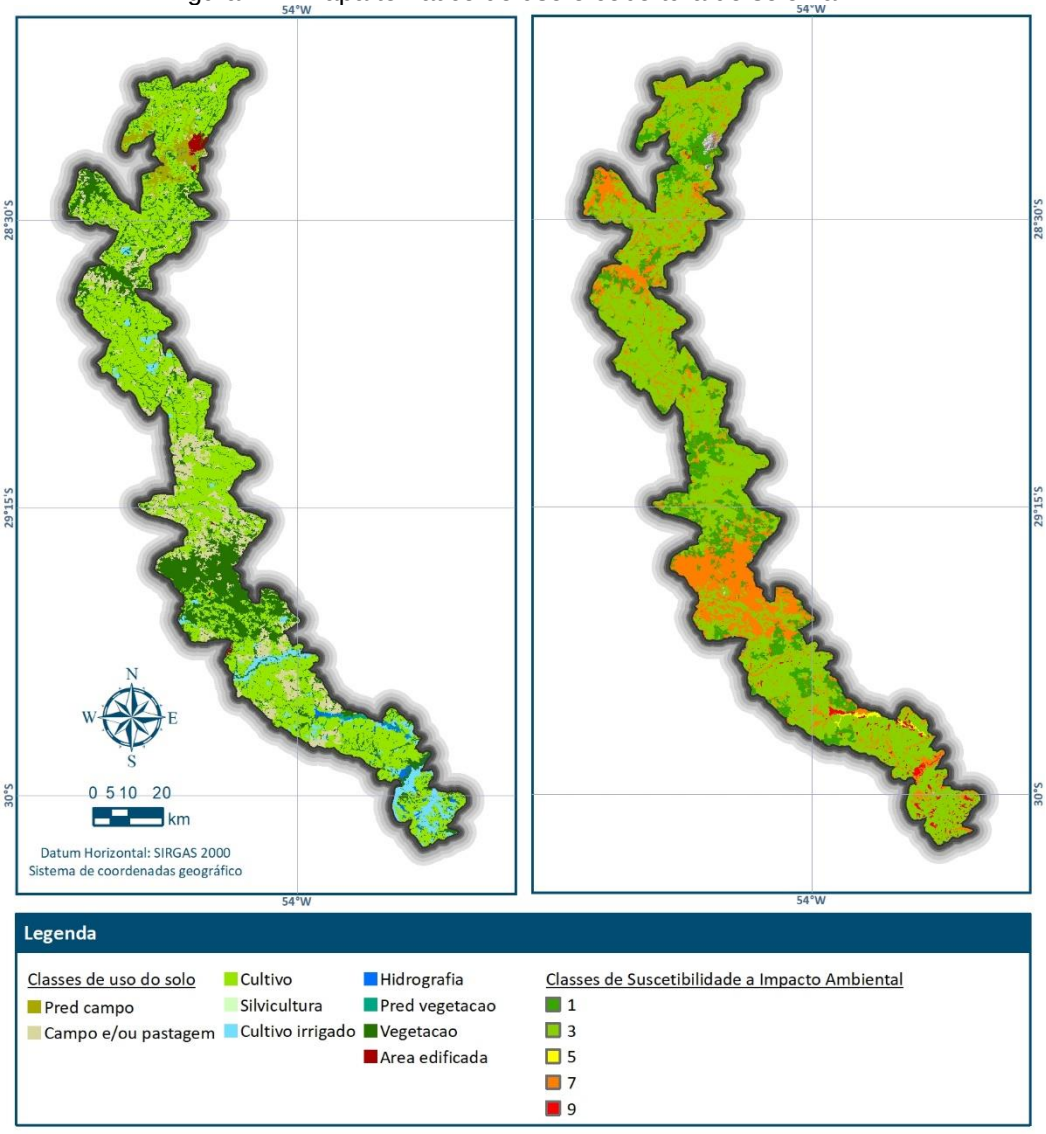
• Vegetação: nesta classe foram individualizadas áreas com vegetação de porte arbóreo-arbustivo, como as matas ciliares no entorno de importantes cursos d’água da região e a vegetação situada no rebordo do planalto;

• Predomínio de vegetação: foram delimitadas nesta classe extensas áreas onde o predomínio de cobertura e/ou uso é de vegetação de porte arbóreo-arbustivo. São áreas onde os outros usos e/ou coberturas representam áreas muito pequenas e, em geral diversificadas;

• Silvicultura: Áreas com cultivo de árvores exóticas para a indústria moveleira ou de papel, entre outros.

Em termos de suscetibilidade a impactos ambientais, considerou-se que quanto maior a fragilidade da classe de uso e cobertura do solo, maior a importância e menos favorável à possibilidade do traçado da rodovia atravessá-la, considerando as definições adotadas em trabalhos semelhantes. Ressalta-se que as áreas urbanizadas (incluídas na classe “área edificada”) foi considerada uma feição restritiva à passagem da Rodovia, haja vista que tal situação implica em processo de indenizações e realocações de famílias e, portanto, foi removida da modelagem. Na Figura 14 é apresentado o mapa temático de uso e cobertura do solo na AE.

Figura 14 - Mapa temático de uso e cobertura do solo na AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

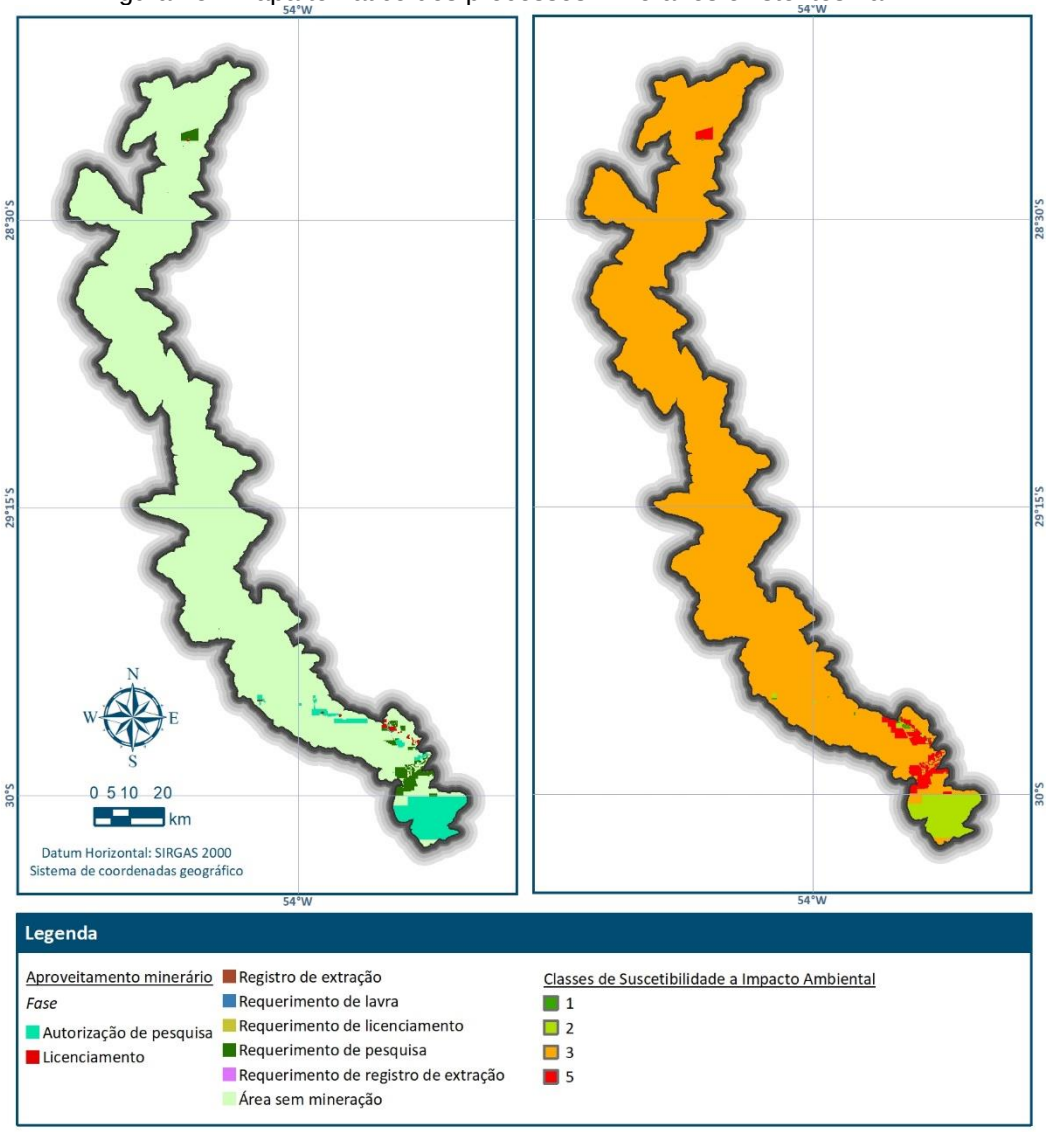
Aproveitamento Mineral

Os recursos minerais existentes na AE foram identificados a partir de consulta ao Sistema de Informações Geográficas da Mineração do DNPM (SIGMINE). As substâncias minerais requeridas junto ao DNPM na AE são: água mineral, areia, areia quartzosa, arenito, argila, basalto, basalto para brita, cascalho, diabásio, minério de cobre e saibro.

As fases em que se encontram tais direitos minerários junto ao DNPM na AE correspondem a: licenciamento; registro de extração; disponibilidade; requerimento de lavra; requerimento de licenciamento; autorização de pesquisa; requerimento de pesquisa; e requerimento de registro de extração. Os dois primeiros casos representam direito de exploração do bem mineral.

Para efeito de comparação, considerou-se que as áreas correspondentes a processos de requerimentos de pesquisa são menos favoráveis a passagem do traçado da rodovia, haja vista que, de modo geral, presume-se que o aproveitamento destas áreas seja inviabilizado até que se realizem estudos e investigações requeridos pelos órgãos competentes. Do contrário, as áreas que correspondem a processos que representam direito de exploração foram consideradas mais favoráveis à passagem do traçado rodoviário, visto que já possuem autorização para exploração mineral, portanto, compreende-se que já haja um conhecimento satisfatório acerca dessas áreas quanto aos potenciais impactos ambientais. Demais áreas que não possuem processos minerários espacializados foram avaliadas com valor intermediário, visto que, em geral, prefere-se que o traçado da rodovia passe próximo a áreas de exploração mineral. Na Figura 15 é apresentado o mapa temático dos processos minerários existentes na AE.

Figura 15 - Mapa temático dos processos minerários existentes na AE



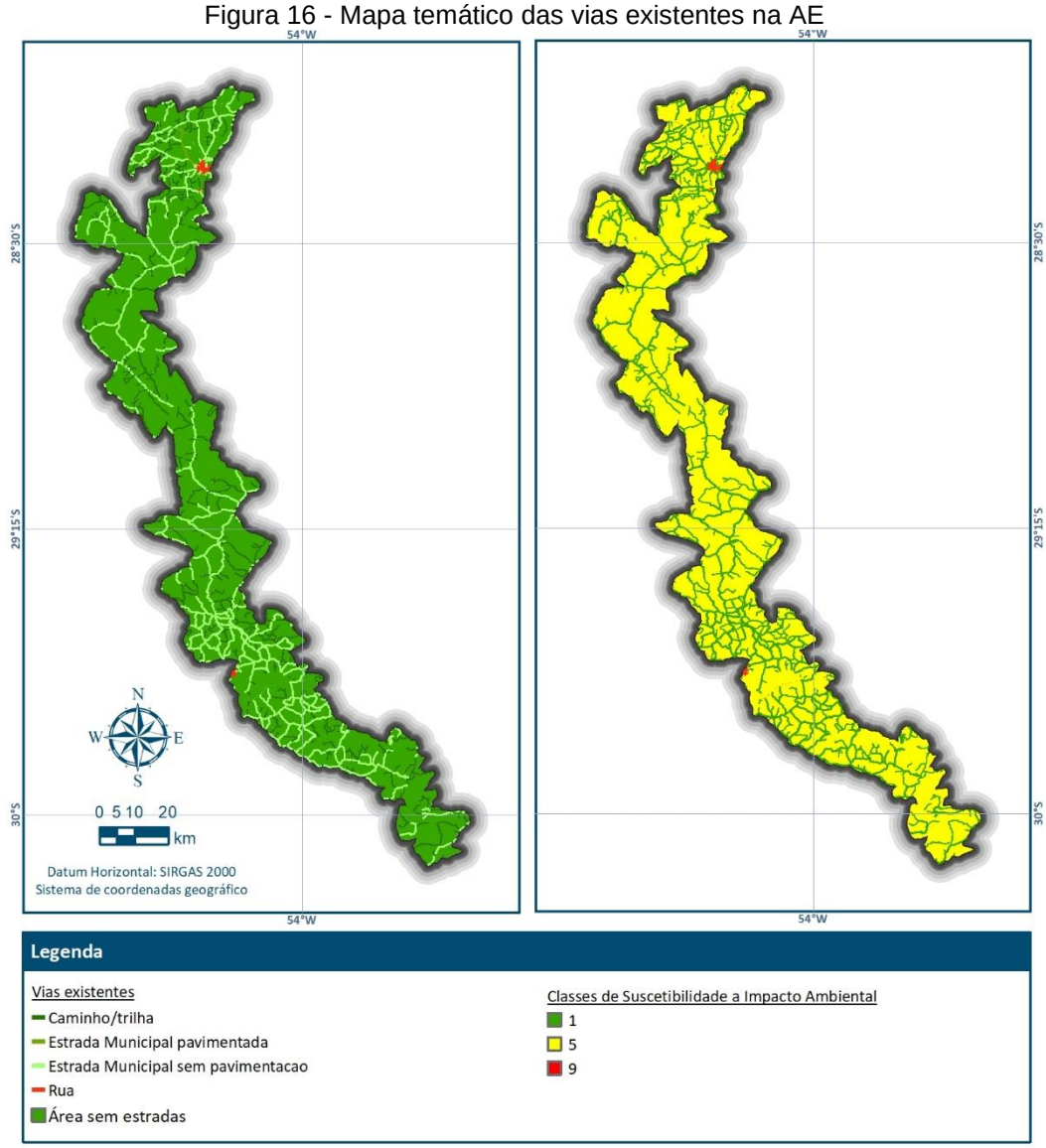
Fonte: Elaborado pelo autor.

Vias Existentes

As alterações da paisagem, uso e cobertura do solo, bem como demais interferências decorrentes da implantação de rodovias podem causar impactos com potencial de afetar os diferentes aspectos do ambiente natural e construído. Neste contexto, o aproveitamento da malha rodoviária existente na região, tais como as estradas vicinais e rodovias estaduais, pode constituir-se em alternativa que minimiza os impactos ambientais, uma vez que não há modificações relativas à abertura de um novo traçado, e ainda, porque a proximidade com acessos já existentes podem representar redução do custo monetário das obras. Com base nisso, considerou-se que quanto mais próximo o traçado modelado estiver de uma via existente, menor o

potencial de impactos devido à implantação da rodovia. Na Figura 16 é apresentado o mapa temático da malha viária existente na AE.

Figura 16 - Mapa temático das vias existentes na AE



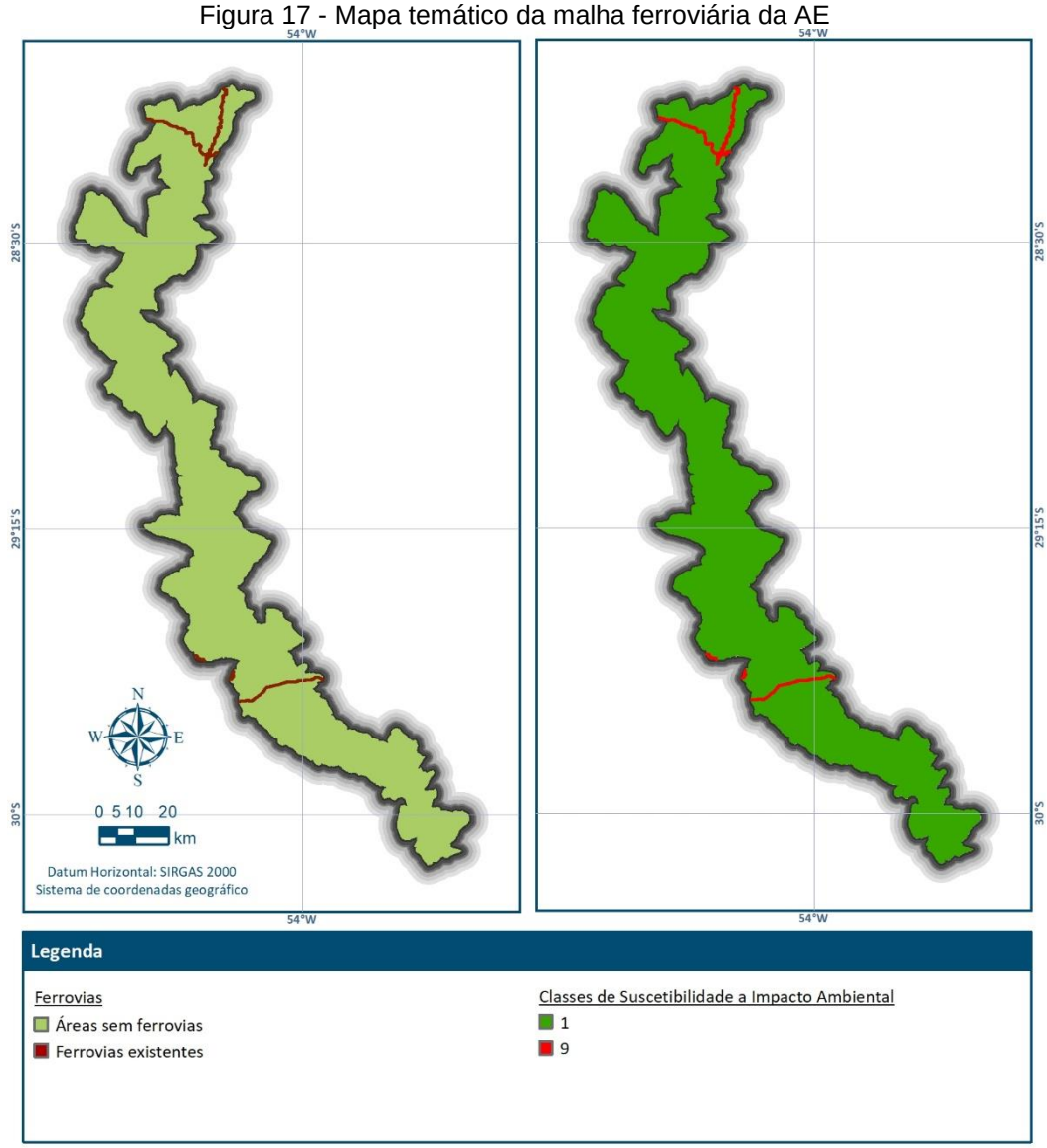
Fonte: Elaborado pelo autor.

Interferência em Ferrovias

A existência de ferrovias na AE constitui-se como obstáculo à implantação de uma rodovia e, por isso, impacta diretamente os custos de projeto, visto que a construção de estrutura de transposição de ferrovias existentes requer a construção de obra de arte especial como viaduto, passagem inferior ou superior que, além de influenciar no aumento dos custos monetários, implica na interrupção do transporte de cargas pela linha férrea até a conclusão das obras.

Neste caso, considera-se a existência de linha férrea como uma condição de menor favorabilidade à passagem do traçado da rodovia. As linhas ferroviárias existentes na AE constam no mapa temático apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Mapa temático da malha ferroviária da AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.6 Aplicação do método AHP

A importância de cada critério em relação à influência global no objeto do estudo é variável conforme as expectativas e percepções dos atores envolvidos no processo de decisão sobre a melhor alternativa de traçado para a implantação da rodovia e, portanto, carrega um elevado grau de subjetividade. Dentre os tomadores de decisão podem estar relacionados políticos, técnicos, representantes do órgão ambiental, entidades de classe, representantes das comunidades, tanto das

beneficiadas quanto das impactadas, sendo que se busca, de mdo geral, atender as expectativas de todos (ALBUQUERQUE, 2015).

Para este estudo foram escolhidos como atores do processo, especialistas atuantes no setor rodoviário com diferentes formações acadêmicas e com larga experiência em estudos de impactos e gestão ambiental de empreendimentos rodoviários, ora denominados como Avaliadores.

Deste modo, para apoio à tomada de decisão na definição da importância (peso relativo) de cada critério considerado no estudo, fez-se uso na metodologia AHP proposta por Saaty (1991) através da aplicação de um questionário a três (3) Avaliadores (Apêndice C). Este questionário foi elaborado em planilha *Excel* e estruturado com base na metodologia AHP, na qual cada critério é avaliado em pares em relação ao objetivo global, no caso deste estudo, a proposição de altenativas de traçado com o menor potencial de ocasionar impactos ambientais, com base na análise de multiplos critérios. Na sequência, os pesos obtidos através dos questionários foram analisados e normalizados. A normalização dos pesos obtidos é necessária para a verificação da consistência dos mesmos. Nos casos em que os pesos atribuidos pelo Avaliador não apresentou consistência coerente com o valor de referência proposto pela metodologia, este foi novamente consultado para realizar novo julgamento. Ao final, obtiveram-se os coeficientes de importância consistentes (pesos relativos) para cada critério.

4.2.7 Preparação da base de dados geoespacializados

Para composição da base de dados foi realizada uma compatibilidade de sistema de coordenadas, aos quais todos os dados geoespaciais foram projetados para o Sistema Geodésico Brasileiro (Sirgas 2000 – Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) em coordenadas planas UTM (*Universal Transversal Mercator*), haja vista que este utiliza o metro (m) como unidade de distâncias e determinar a posição de um objeto, permitindo desta forma a realização automatizada dos procedimentos computacionais previstos. O sistema de coordenadas UTM, segundo o Sampaio (2018), divide o planeta em 60 fusos, numerados de 01 até 60, Norte (N) e Sul (S), sendo que a AE encontra-se situada predominantemente no fuso 21S.

Outra compatibilização que se fez necessária foi a conversão dos dados em formato vetor para o formato *raster* (rasterização), com resolução de células de 30m, ou seja, com tamanho do *pixel* igual a 30m, compatível com o MDE utilizado.

Dentre os 11 critérios selecionados, a Declividade, Potencial erosivo dos solos, uso e cobertura do solo e APP foram obtidos através de técnicas de geoprocessamento de dados do tipo *raster* como o MDE (declividade) e imagens de satélite (uso e cobertura do solo), arquivos vetoriais (APP) ou ambos (Potencial erosivo dos solos). Os demais critérios estavam disponíveis em formato vetorial (geometria em polilinha ou polígono), sendo necessária apenas a rasterização.

Após a preparação da base de dados, atribuição de pesos absolutos às classes dos critérios e obtenção dos pesos relativos através da análise AHP, geraram-se os mapas temáticos em formato *raster* para cada um dos critérios.

4.2.8 Aplicação de ferramentas SIG para modelagem de traçado otimizado

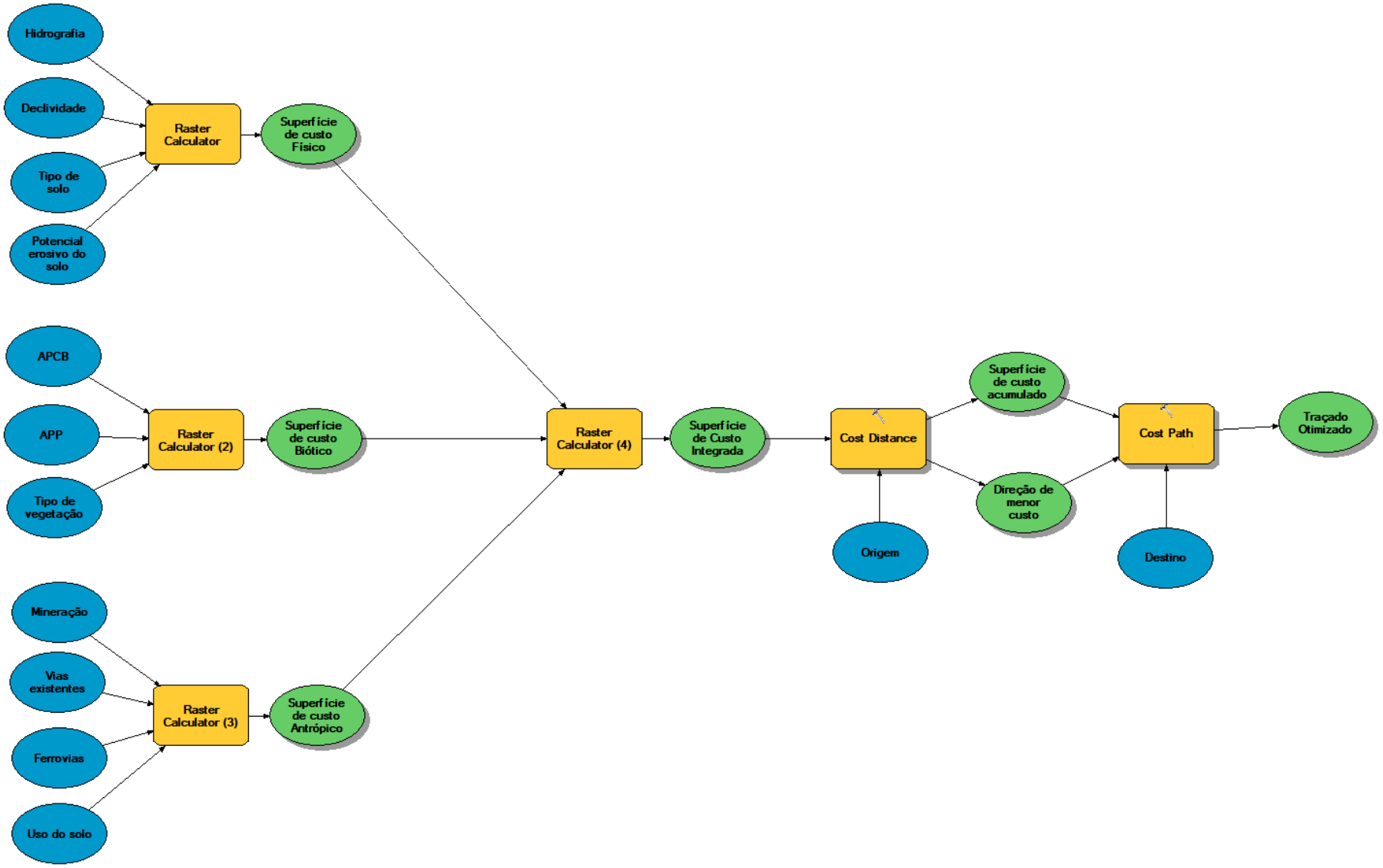
Com os pesos relativos e os mapas temáticos obtidos para cada critério, fez-se uso de diferentes ferramentas disponíveis no software *ArcMap* 10.5 (versão de teste). Para a obtenção do mapa de superfície de custo (que neste estudo representa a sescetibilidade para ocorrência de impactos ambientais), inicialmente, foi utilizado o processo de álgebra de mapas, no qual se utilizou a ferramenta *Raster Calculator,* tendo como *inputs* os pesos relativos e os mapas temáticos de cada critério, separado de acordo com o meio*.*

O mapa de custo acumulado foi gerado a partir da utilização da ferramenta *Cost Distance,* onde o custo associado a cada célula representa o resistência por unidade de distância por se deslocar através da célula*,* juntamente com a ferramenta *Cost Backlink,* a qual identifica os vértices de ligação entre uma célula e outra subjacente, considerando os menores custos. Utilizaram-se como *inputs* o mapa de superfície de custo obtido anteriormente, e o ponto de origem. Por fim, foi utilizada a ferramenta *Cost Path*, em que se consideram como *inputs* os arquivos gerados anteriormente e o ponto de destino, gerando o Traçado otimizado.

Estas ferramentas foram compiladas num modelo de fluxo do trabalho no ambiente *Model Builder* do software *ArcMap 10.5*, possibilitando a estruturação de uma rotina automatizada de aplicação, conforme ilustrado na

Figura 18. Esta estruturação através do Model Builder foi necessária para agilizar o processamento, haja vista os diferentes cenários resultantes da aplicação do método AHP.

Figura 18 - Processo automatizado da modelagem de traçado otimizado no software *ArcMap 10.5*



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.9 Comparação entre os resultados obtidos na modelagem dos traçados

A utilização de dados quantitativos para as alternativas de traçado resultantes é importante para possibilitar a análise comparativa entre as mesmas. A partir de cada traçado foi calculado um Índice de Similitude (IS), utilizando diferentes ferramentas do software adotado, conforme os seguintes passos:

i) Converteu-se o traçado gerado em formato matricial para vetor polilinha (*Raster to polyline*);
ii) Calculou-se a extensão total para o vetor de cada Traçado otimizado (km);
iii) Utilizou-se a ferramenta *Buffer* para gerar a Área Diretamente Afetada – ADA, abrangendo uma faixa de 100m para cada lado do traçado;
iv) A similitude entre os traçados foi obtida por meio da razão entre o somatório das parcelas da ADA de um Traçado que intercepta (Traçado x) a ADA de outro Traçado (Traçado y) e a ADA total deste. O IS pode ser obtido para comparação entre os Traçados otimizados e em relação destes ao Traçado preliminar definido no EVTEA;

$$IS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P1_{Traçado_x} + P2_{Traçado_x} + Pn_{Traçado_x})}{ADA_{Traçado_y}}$$

Em que,

IS = índice de Similitude
P = Parcela da ADA comum entre dois Traçados comparados (km²);
ADA = Área Diretamente Afetada (km²)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item serão apresentados os principais resultados obtidos e a análise realizada em relação aos objetivos inicialmente propostos.

5.1 Aplicação do método AHP para Determinação dos Pesos Relativos

Com base nos resultados do questionário aplicado aos especialistas (Apêndice C) foi estruturada uma matriz para normalização dos valores obtidos, verificação da consistência e obtenção dos pesos relativos para cada critério. A normalização foi feita pela divisão de cada elemento da matriz pela soma da coluna a que pertence.

Nas tabelas e gráficos a seguir são apresentados os pesos obtidos para os critérios, conforme a percepção de cada avaliador.

Avaliador A

Tabela 4 - Matriz comparativa do Avaliador A para os critérios do meio físico.

Critérios	Declividade	Tipo de solo	Interferência em águas superficiais	Potencial erosivo do solo
Declividade	1,00	1,00	3,00	0,20
Tipo de solo	1,00	1,00	3,00	0,20
Interferência em águas superficiais	0,33	0,33	1,00	0,14
Potencial erosivo do solo	5,00	5,00	5,00	1,00
Peso Relativo	**0,163**	**0,163**	**0,067**	**0,607**
Razão de Consistência		**0,035**		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Matriz comparativa do Avaliador A para os critérios do meio biótico.

Critérios	Tipo de Vegetação	Área de preservação permanente	Áreas prioritárias para conservação
Tipo de vegetação	1,00	0,20	3,00
Área de preservação permanente	5,00	1,00	5,00
Áreas prioritárias para conservação	0,33	0,20	1,00
Peso Relativo	**0,211**	**0,686**	**0,102**
Razão de Consistência		**0,088**	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Matriz comparativa do Avaliador A para os critérios do meio antrópico.

Critérios	Uso e cobertura do solo	Aproveitamento mineral	Vias existentes	Interferência em ferrovia
Uso e cobertura do solo	1,00	1,00	0,50	0,14
Aproveitamento mineral	1,00	1,00	1,00	0,14
Vias existentes	2,00	1,00	1,00	0,14
Interferência em ferrovia	7,00	7,00	7,00	1,00
Peso Relativo	**0,086**	**0,099**	**0,122**	**0,693**
Razão de Consistência		**0,022**		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliador B

Tabela 7 - Matriz comparativa do Avaliador B para os critérios do meio físico.

Critérios	Declividade	Tipo de solo	Interferência em águas superficiais	Potencial erosivo do solo
Declividade	1,00	3,00	5,00	5,00
Tipo de solo	0,33	1,00	3,00	5,00
Interferência em águas superficiais	0,20	0,33	1,00	0,50
Potencial erosivo do solo	0,20	0,20	2,00	1,00
Peso Relativo	**0,532**	**0,280**	**0,081**	**0,107**
Razão de Consistência		**0,084**		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 - Matriz comparativa do Avaliador B para os critérios do meio biótico.

Critérios	Tipo de Vegetação	Área de preservação permanente	Áreas prioritárias para conservação
Tipo de vegetação	1,00	0,20	3,00
Área de preservação permanente	5,00	1,00	7,00
Áreas prioritárias para conservação	0,33	0,14	1,00
Peso Relativo	**0,193**	**0,724**	**0,083**
Razão de Consistência		**0,045**	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Matriz comparativa do Avaliador B para os critérios do meio antrópico.

Critérios	Uso e cobertura do solo	Aproveitamento mineral	Vias existentes	Interferência em ferrovia
Uso e cobertura do solo	1,00	5,00	0,33	1,00
Aproveitamento mineral	0,20	1,00	0,33	0,33
Vias existentes	3,00	3,00	1,00	2,00
Interferência em ferrovia	1,00	3,00	0,50	1,00
Peso Relativo	**0,248**	**0,088**	**0,438**	**0,226**
Razão de Consistência		**0,074**		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Avaliador C

Tabela 10 - Matriz comparativa do Avaliador C para os critérios do meio físico.

Critérios	Declividade	Tipo de solo	Interferência em águas superficiais	Potencial erosivo do solo
Declividade	1,00	3,00	3,00	1,00
Tipo de solo	0,33	1,00	1,00	0,20
Interferência em águas superficiais	0,33	1,00	1,00	1,00
Potencial erosivo do solo	1,00	5,00	1,00	1,00
Peso Relativo	**0,372**	**0,114**	**0,176**	**0,339**
Razão de Consistência		**0,072**		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11 - Matriz comparativa do Avaliador C para os critérios do meio biótico.

Critérios	Tipo de Vegetação	Área de preservação permanente	Áreas prioritárias para conservação
Tipo de vegetação	1,00	0,33	1,00
Área de preservação permanente	3,00	1,00	3,00
Áreas prioritárias para conservação	1,00	0,33	1,00
Peso Relativo	**0,200**	**0,600**	**0,200**
Razão de Consistência		**0,000**	

Fonte: Autor do trabalho.

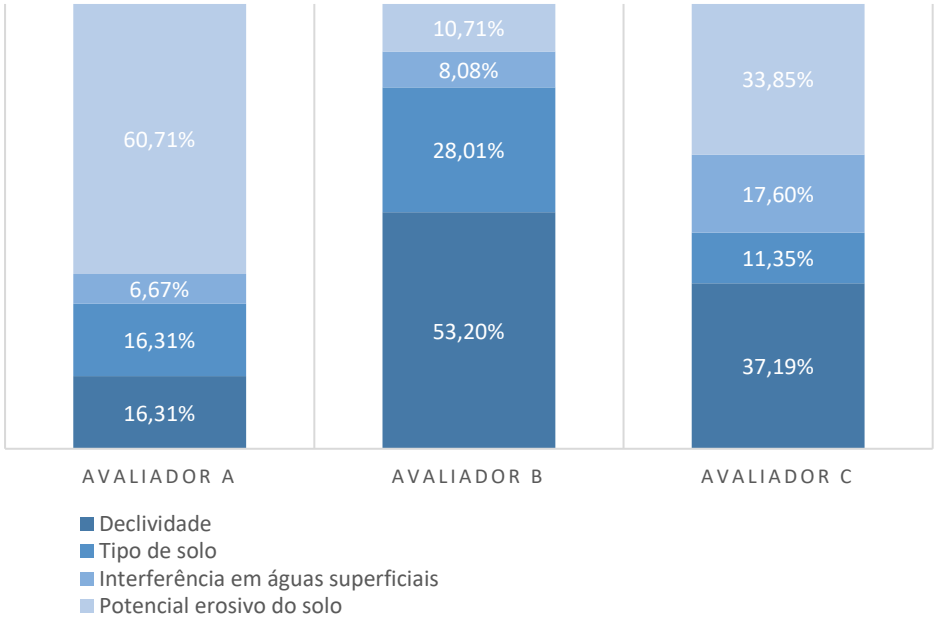
Tabela 12 - Matriz comparativa do Avaliador C para os critérios do meio antrópico.

Critérios	Uso e cobertura do solo	Aproveitamento mineral	Vias existentes	Interferência em ferrovia
Uso e cobertura do solo	1,00	3,00	1,00	3,00
Aproveitamento mineral	0,33	1,00	0,20	0,33
Vias existentes	1,00	5,00	1,00	3,00
Interferência em ferrovia	0,33	3,00	0,33	1,00
Peso Relativo	**0,357**	**0,083**	**0,399**	**0,161**
Razão de Consistência		**0,038**		

Fonte: Autor do trabalho.

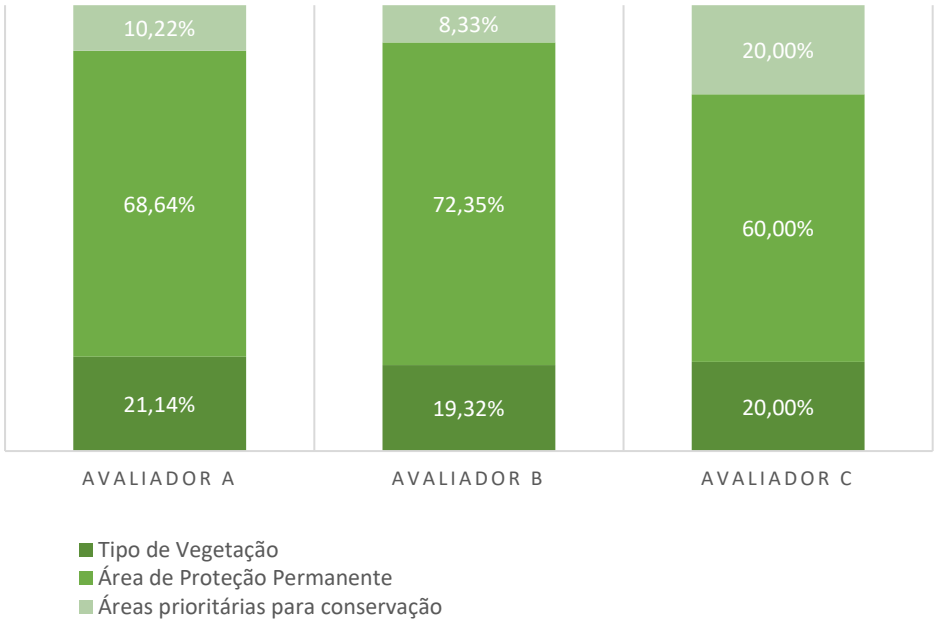
Nos gráficos a seguir é apresentado um resumo comparativo dos resultados dos pesos relativos que constam nas tabelas anteriores, obtidos a partir da percepção de importância dos diferentes avaliadores.

Gráfico 1 - Pesos relativos referente aos critérios do meio físico atribuídos pelos avaliadores.



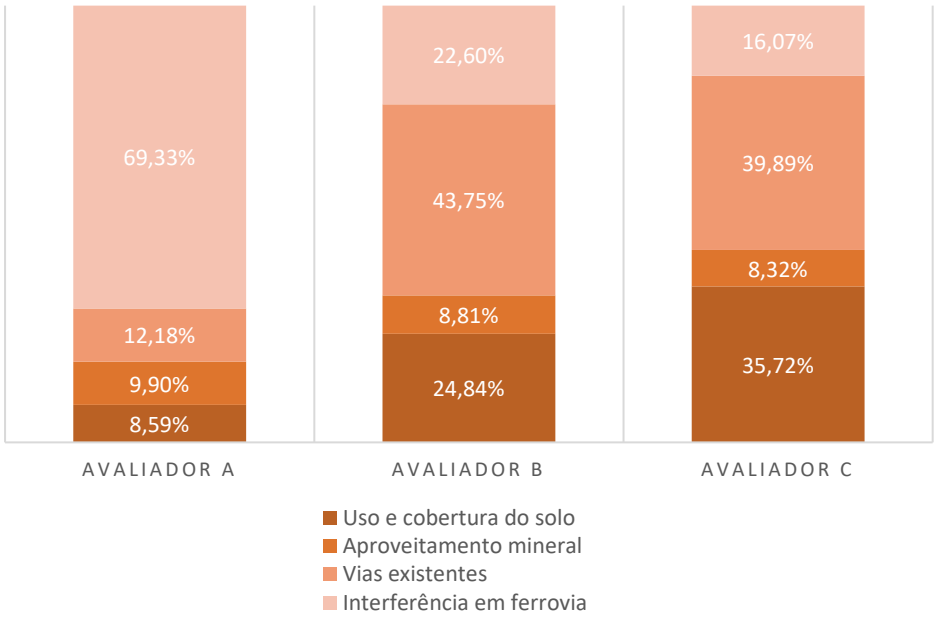
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 - Pesos relativos referente aos critérios do meio biológico atribuídos pelos avaliadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 3 - Pesos relativos referente aos critérios do meio antrópico atribuídos pelos avaliadores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Numa análise holística, os resultados obtidos mostram evidentes diferenças de percepção em termos de importância em relação aos critérios, mas também muitas similitudes.

Em relação ao meio Físico, a maior importância foi atribuída aos critérios *Declividade* e *Potencial erosivo do solo*, sendo que a *Interferência em águas superficiais* foi o critério avaliado com menor importância. Quanto ao meio Biótico, a ordem de importância dos critérios foi a mesma entre as três avaliações, onde o critério *APP* foi avaliado com maior importância enquanto que as *Áreas prioritárias para a conservação biológica* receberam menor importância. Já em relação ao meio Antrópico, as diferenças mais representativas decorrem do Avaliador A. Para este, a maior importância foi atribuída a *Interferência em ferrovias* e a menor ao *Uso do solo*. Os demais avaliadores consideraram que o critério *Vias existentes* representa a maior importância em relação a este meio, seguido pelo *Uso e cobertura do solo*. O menor peso relativo, em geral, foi obtido para o critério *Aproveitamento mineral*.

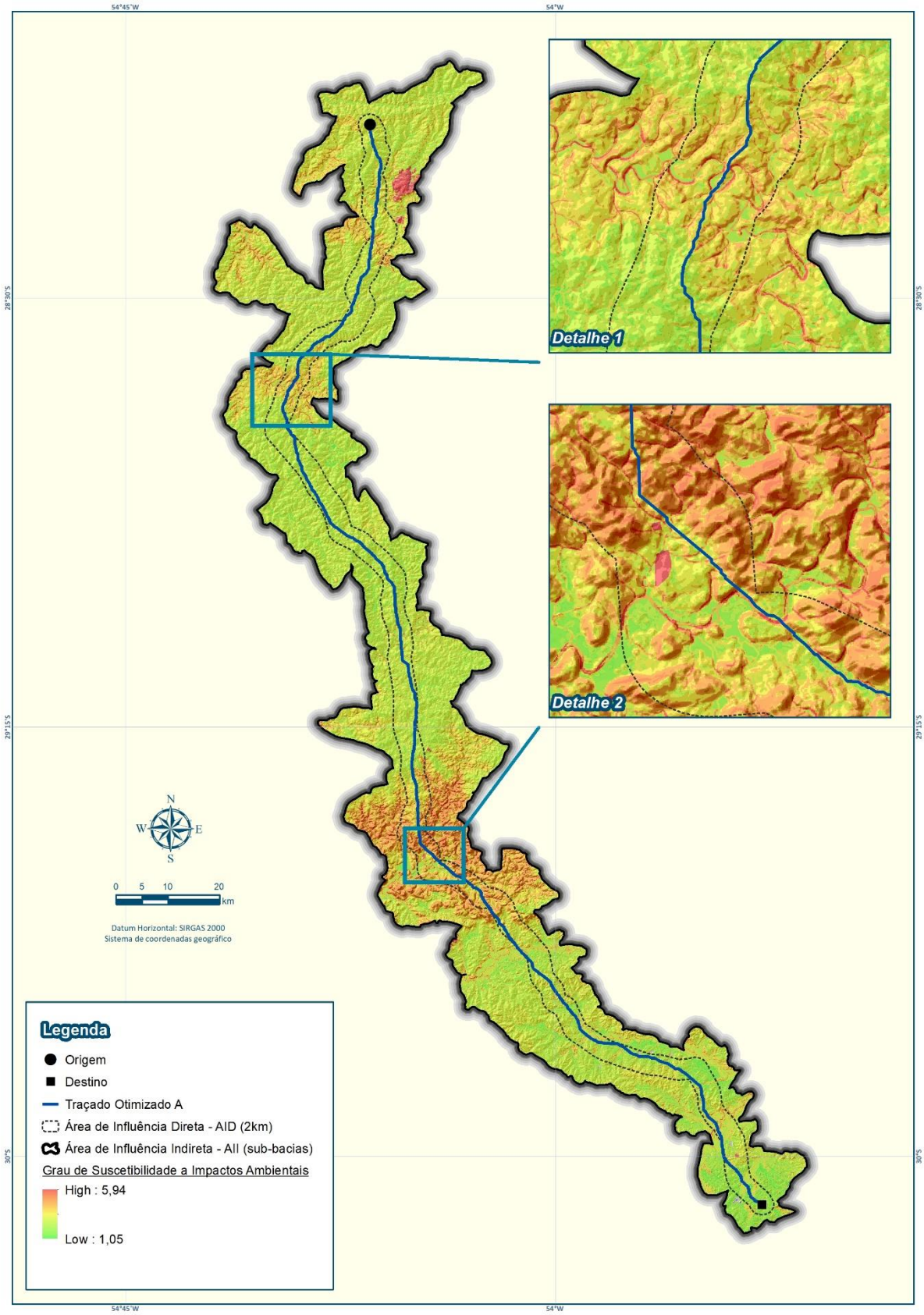
Resultados semelhantes foram obtidos na modelagem de traçados de mínimo custo para uma ferrovia em estudo realizado por Albuquerque (2015), onde se verificou que os critérios geoambientais *Declividade* e *APP* também foram aqueles avaliados com maior importância com aplicação do método AHP, tal como nos resultados obtidos neste estudo.

A Razão de Consistência, conforme apresentada anteriormente nas matrizes de comparação pareada dos avaliadores construídas para cada meio, permite inferir que há coerência na atribuição das importâncias dos critérios, validando, deste modo, as avaliações realizadas.

5.2 Geração de Traçados Otimizados de Menor Impacto Ambiental

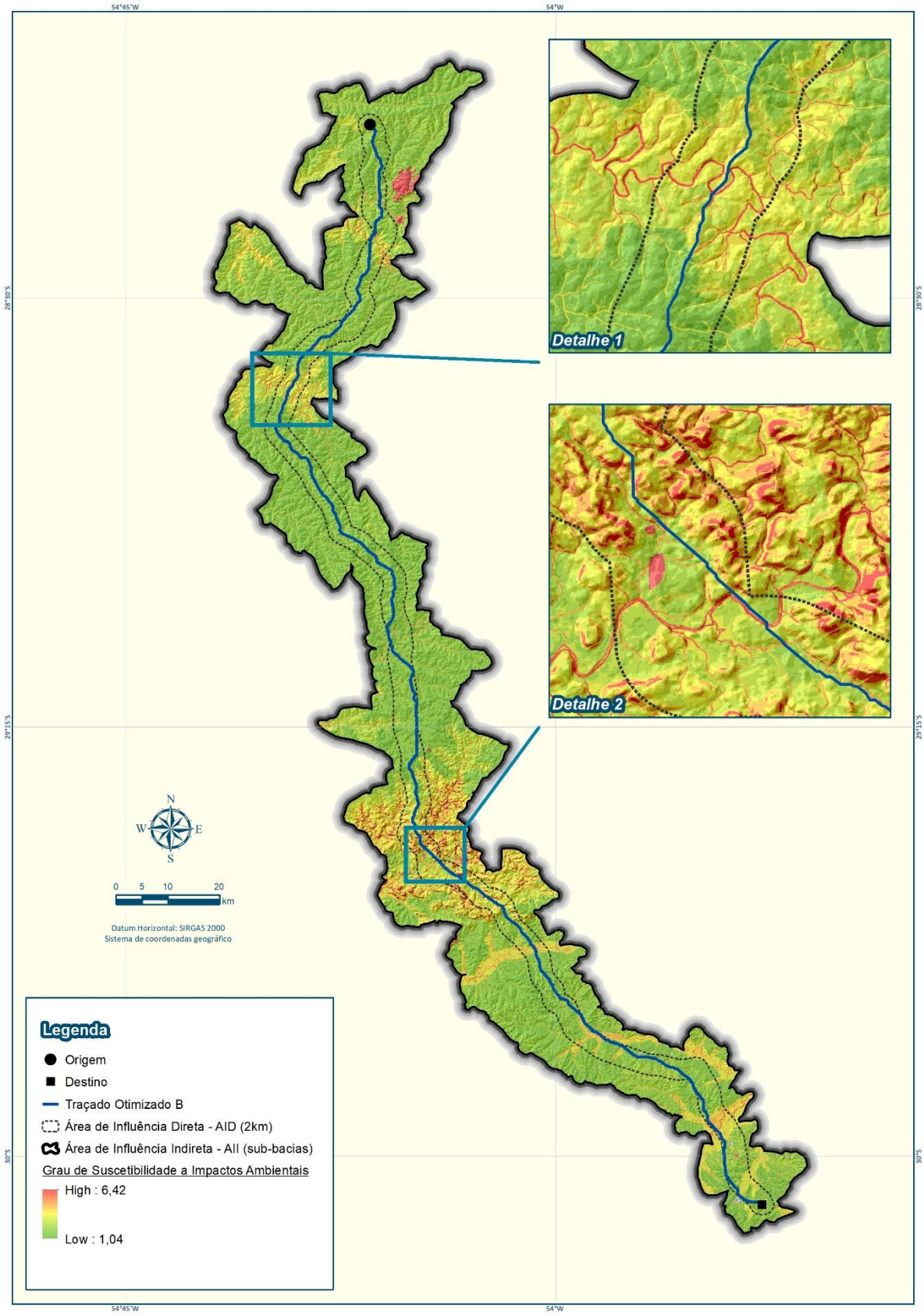
Através da ponderação dos pesos obtida para os critérios considerados, combinada à álgebra de mapas, inicialmente foi gerado o mapa de superfície de custo. Posteriormente, considerando a integração dos três meios, foi gerado um único mapa denominado neste estudo como Mapa de Suscetibilidade a Impactos Ambientais. A partir deste mapa (que representa a superfície de custo), do mapa de superfície de custo acumulado, do mapa de superfície de orientação de menor custo, e dos pontos de origem e destino, foram gerados os traçados otimizados conforme apresentado nas figuras a seguir.

Figura 19 - Mapa de suscetibilidade a impactos ambientais - Traçado Otimizado A



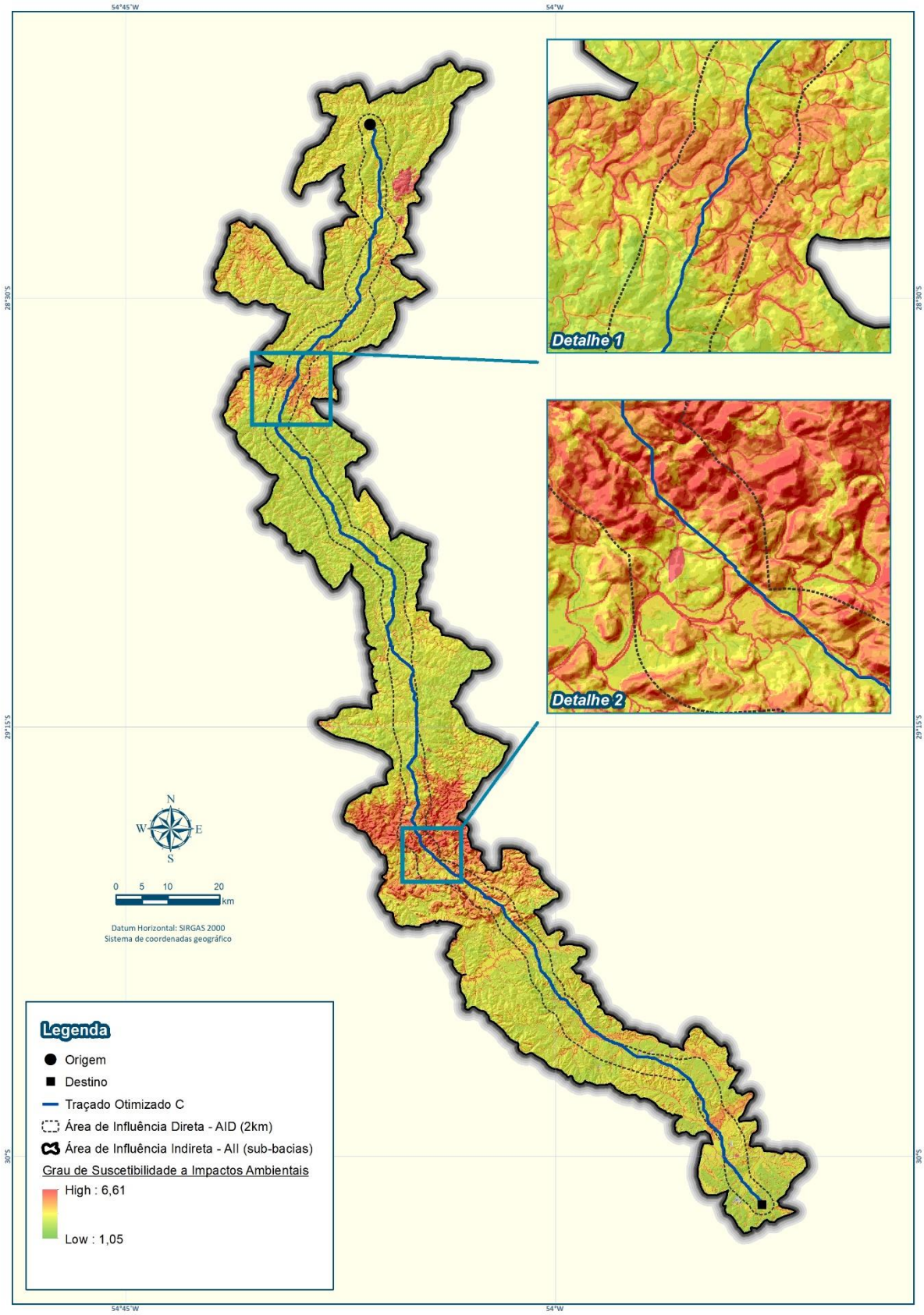
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 20 - Mapa de suscetibilidade a impactos ambientais - Traçado Otimizado B



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 21 - Mapa de suscetibilidade a impactos ambientais - Traçado Otimizado C



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mapas de suscetibilidade a impactos ambientais evidenciam as diferenças consideradas pelos avaliadores no método de avaliação multicritério. Podem ser destacadas as áreas de APP situadas mais ao norte da AE e áreas de elevado potencial erosivo na porção centro-sul da AE, as quais representam, de modo geral, as porções mais suscetíveis a ocorrência de impactos ambientais.

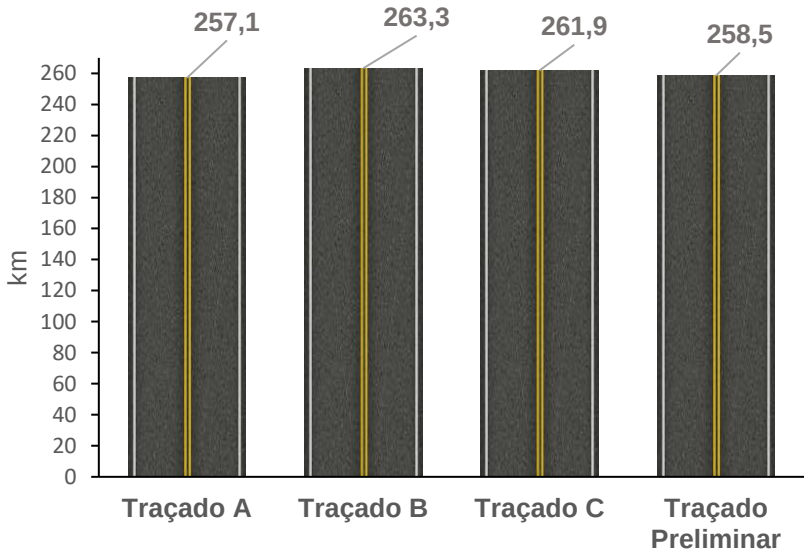
Foi observado ainda que os critérios com feições (ou classes) que abrangem toda a AE e que também figuraram entre os mais importantes, como a Declividade, Potencial erosivo e Uso e cobertura do solo, foram os que exerceram maior influência no delineamento dos traçados.

Desta forma, o valor do peso associado é quem determina se as feições são contornadas ou preferencialmente atravessadas. Por isso que a avaliação da importância de cada um dos critérios para a determinação do melhor traçado não pode ser feita apenas com base na análise dos pesos relativos atribuídos pelos avaliadores, visto que a localização e abrangência espacial das feições geográficas dos critérios tem grande relevância na definição do traçado e, portanto, os pesos absolutos das classes também exercem papel fundamental na modelagem.

5.3 Análise Comparativa dos Traçados Otimizados

O Gráfico 4 a seguir apresenta as extensões (km) obtidas para os traçados modelados.

Gráfico 4 - Extensão dos Traçados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme se observa, o Traçado B apresentou a maior extensão (263,3 km), fato que se justifica, pois o critério *Declividade* teve um peso mais expressivo atribuído pelo Avaliador B, fazendo com que o traçado buscasse realizar mais contornos devido às imposições topográficas do terreno.

Na análise comparativa visual entre os traçados gerados (Figura 22), foi verificado que os Traçados B e C apresentaram delineamentos semelhantes entre si ao longo de suas extensões, com uma diferença um pouco mais representativa apenas entre o km 250+000[1] até o ponto de destino. Já o Traçado A apresentou significativas diferenças dos demais, principalmente nos segmentos entre: km 65+000 e km 90+000; km 100+000 e km 120+000; e km 175+000 e km 215+000. No segmento final, entre o km 250+000 e o ponto de destino, este traçado é semelhante ao Traçado C.

Em comparação ao Traçado preliminar, evidenciaram-se situações distintas. Enquanto os Traçados B e C notoriamente apresentaram maior semelhança em relação ao Traçado preliminar ao longo de boa parte da extensão, especialmente entre os segmentos do km 45+000 ao 110+000 e do km 140+000 ao 200+000, o Traçado A apresentou pouca semelhança com o Traçado preliminar.

É interessante salientar que os Traçados B e C (mais semelhantes entre si e em relação ao Traçado preliminar) foram delineados tendo como critérios mais

[1] Formato numérico utilizado nos projetos rodoviários para indicar a extensão do eixo principal.

importantes (ou seja, que representam maior suscetibilidade de impactos ambientais) a Declividade, o Potencial erosivo, as APP, Uso e cobertura do solo e Vias existentes. Isso denota uma influência expressiva destes tipos de critérios na definição do Traçado preliminar, principalmente a Declividade e Vias existentes, ainda que de forma indireta, visto que a metodologia adotada neste estudo não foi empregada no EVTEA.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de similitude entre os Traçados otimizados e também em relação ao Traçado preliminar.

Tabela 13 - Índice de Similitude obtido entre os traçados.

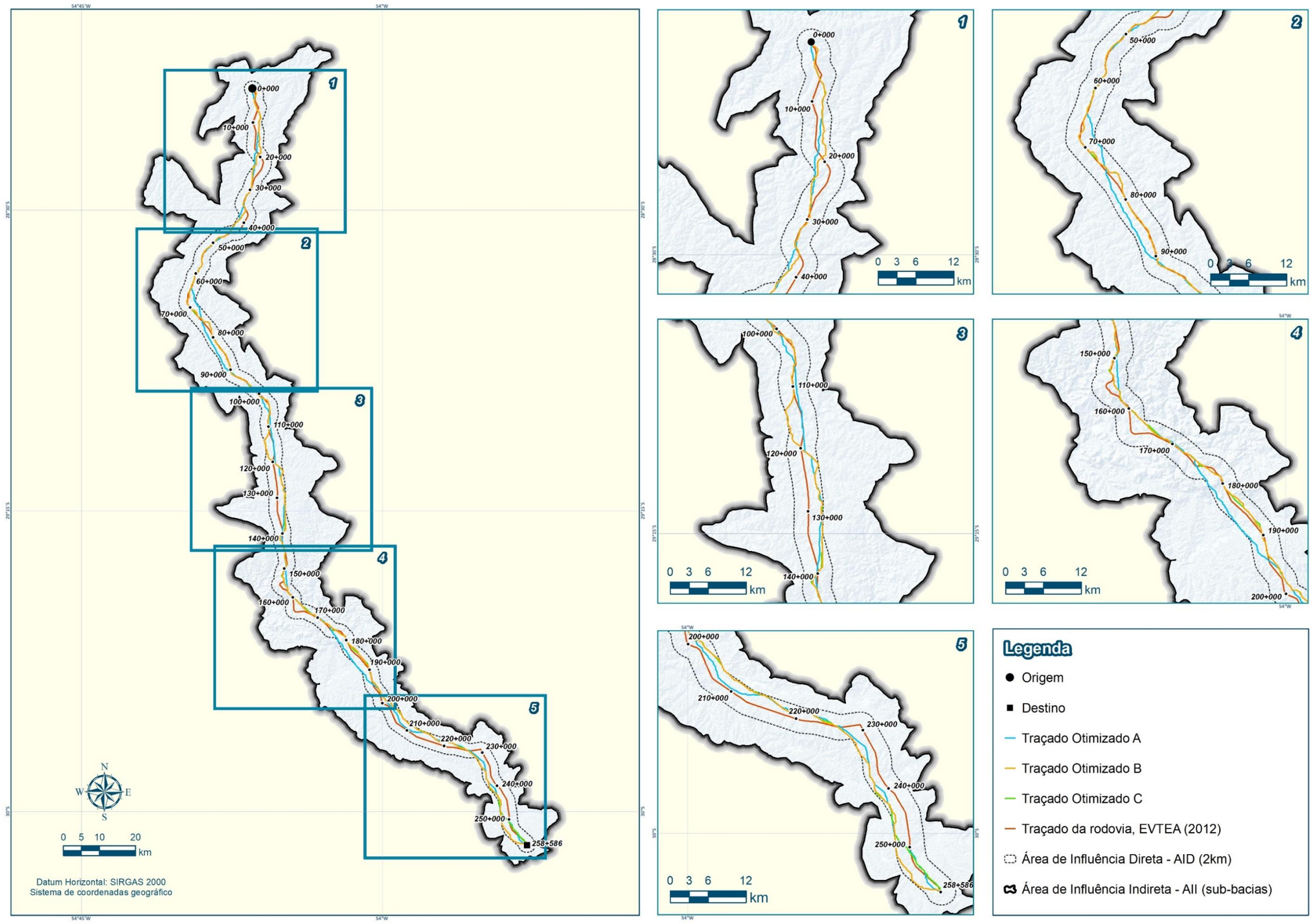
ADA dos Traçados	Índice de Similitude
Traçado Preliminar e Traçado A	0,148
Traçado Preliminar e Traçado B	0,263
Traçado Preliminar e Traçado C	0,276
Traçado A e Traçado B	0,343
Traçado A e Traçado C	0,390
Traçado B e Traçado C	0,879

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise dos resultados apresentados mostra que o percentual da ADA dos Traçados B e C apresentou maior similitude com o traçado do EVTEA, do mesmo modo que na análise visual. A ADA do Traçado preliminar foi interceptada pelos Traçados B e C em cerca da 26% e 27%, respectivamente, sendo que o Traçado A apresentou similitude de aproximadamente 15%. Quando comparadas as semelhanças apenas entre os traçados gerados, observou-se que aproximadamente 88% da ADA dos Traçados B e C foram concordantes.

Conforme pode ser visualizado na Figura 22, essas diferenças de similitude são facilmente perceptíveis. Neste sentido, o Traçado C foi o que apresentou maior semelhança com o Traçado preliminar quanto ao percentual da ADA interceptada, ainda que o Traçado B também tenha apresentado resultados parecidos.

Figura 22 - Traçados Otimizados gerados na modelagem e o Traçado preliminar



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 CONCLUSÕES

É importante destacar que os critérios utilizados não caracterizam todos os elementos que podem interferir na passagem de uma rodovia numa determinada área. Os critérios Comunidades quilombolas e Terras indígenas, por exemplo, são imprescindíveis para estudos desta natureza, e por isso, devem ser sempre considerados em função de sua relevância social, cultural e ambiental. Estes critérios não foram considerados neste trabalho por não estarem presentes na AE definida.

Também não foram utilizados, por exemplo, critérios que representam aspectos como a interferência nas águas subterrâneas, a litologia, entre outros, que também são importantes para o tipo de análise realizada, mas que exigem que os dados estejam disponíveis em escala de maior detalhamento.

Da mesma forma, os cenários criados a partir dos pesos não representam necessariamente a totalidade de visões envolvidas na definição do melhor local à passagem da Rodovia. Ainda assim, os dados geoespaciais utilizados proporcionam uma representatividade satisfatória da AE em relação aos principais fatores sobre os quais há maior potencial de ocorrência de impactos ambientais.

O uso da álgebra de mapas se mostrou eficiente para a geração das superfícies de custo, visto que permite certa flexibilidade para alteração dos pesos relativos aos critérios, o que possibilita a criação de cenários alternativos. Ainda, possibilita facilidade de compreensão quanto aos cálculos envolvidos, uma vez que se baseia na média ponderada entre o valor dos pixels de cada mapa temático e o peso dado pela importância relativa.

Optou-se por modelar traçados alternativos em relação a maior ou menor favorabilidade à passagem da Rodovia, tendo como análise preponderante, a suscetibilidade da área estudada em relação a impactos ambientais potenciais. Embora esta avaliação seja voltada à análise de impactos, considera também, mesmo que indiretamente, critérios relacionados à viabilidade técnica e econômica do empreendimento proposto, como por exemplo, a declividade do terreno, tipo de solos e hidrografia, os quais representam aspectos de alta relevância técnico-econômica para as definições dos futuros projetos de engenharia.

Os resultados obtidos fornecem informações tecnicamente embasada e representativas para a seleção de alternativas ambientalmente viáveis de ligação

entre os pontos de interesse, considerando que é nesta fase de planejamento do empreendimento que podem ser realizadas as adequações que melhor justifiquem o atendimento às necessidades explicitadas no estudo. Porém, não esgotam necessariamente todas as possibilidades.

Dessa forma, esses resultados constituem subsídio importante à tomada de decisão sobre a localização do traçado mais adequado e mostram que a avaliação de alternativas adicionais ao traçado preliminarmente definido no EVTEA, com uma análise mais detalhada sobre a área prevista para a implantação do futuro empreendimento, pode ser necessária para uma discussão mais abrangente, especialmente na fase do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) do empreendimento e desenvolvimento dos projetos de engenharia que antecedem a obtenção da Licença Prévia do empreendimento.

O emprego do método de análise multicritério AHP para a valoração de diferentes aspectos, variáveis ou critérios integrado ao SIG, como foi o caso deste estudo, proporciona uma análise confiável ao mesmo tempo que é flexível, visto que em qualquer momento o processo pode ser repetido ou modificado, contemplando novos limites, a retirada, substituição ou inclusão de um novo fator ou critério.

Uma vez que diferentes critérios sejam valorados adequadamente e possam ser tratados digitalmente, o algoritmo adotado pelo software utilizado é capaz de fazer uma análise exaustiva considerando todas as variações possíveis visando obter caminhos de mínimo custo (no caso deste estudo, traçados de menor impacto ambiental), proporcionando a minimização da subJetividade da análise.

Convém ressaltar que o estudo apresenta limitações devido a resolução das imagens de satélite e MDE utilizadas. Deste modo, resultados mais precisos de modelagem poderão ser obtidos tanto quanto melhor for a resolução das imagens.

As similitudes verificadas entre o traçado preliminar definido no EVTEA e os traçados otimizados modelados indicam potencialidade de aplicação da metodologia adotada neste estudo em relação à forma com que a definição de novos traçados rodoviários é comumente realizada, sem a utilização de técnicas de análise multicritério integradas para delineamento do melhor traçado.

Convém ressaltar ainda que os critérios de adoção dos pesos, bem como a própria valoração destes devem atender a diferentes interesses, possibilitando, por

esta razão, também diferentes interpretações. O que tem de se ter bem claro é que a construção deste processo é que dará a confiança necessária para aplicação do método.

Os pesos utilizados, tanto absolutos quanto relativos, são imprescindíveis a estudos semelhantes, pois, como se observou, os resultados da modelagem proposta é diretamente dependente destes. Por isso, o processo de definição dos pesos pode ser uma etapa longa e complexa, com debates e discussões, inserindo o conhecimento específico de vários profissionais a fim de contemplar variáveis e pesos sob um maior número de pontos de vista.

Ainda assim, os cenários utilizados podem servir de referência para eventuais avaliações de empreendiementos semelhantes, nos quais se poderá alterar os tipos de funções empregadas, os pesos dos critérios utilizados ou os próprios, substituindo-os ou adicionando novos. Embora ainda exista subjetividade na avaliação desse tipo de empreendimento, o procedimento adotado neste estudo torna-o transparente, disponível para o debate e passível de modificação.

Por fim, as rotinas de otimização de traçados rodoviários como as implemetadas neste trabalho podem reduzir significativamente o tempo de uma análise preliminar quanto a sua viabilidade. Também podem ser facilmente incorporadas em estudos e anteprojetos de traçados de outras obras de infraestrutura linear, sem incorrer, necessariamente, em custos monetários elevados.

6.1 Propostas para Trabalhos Futuros

Sugere-se as seguintes abordagens para trabalhos futuros referentes ao tema deste estudo:

- Considerar outros cenários, como a inclusão de outros critérios e diferentes percentuais relativos aos meios físico, biótico e antrópico;
- Aplicar a metodologia considerando a participação de uma equipe multidisciplinar para a avaliação tanto dos pesos relativos quanto dos pesos absolutos dos critérios;
- Definir os pesos a partir de outros métodos de análise multicritério e comparar com o método AHP;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, S. M. **Modelagem de Alternativas de Traçado de Ferrovias com Uso de Ferramentas de SIG e Parâmetros Geoambientais**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília - UnB. Brasília, p. 173. 2015.

BAGLI, S.; GENELETTI, D.; ORSI, F. Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. **Environmental Impact Assessment Review**, 10 Nov. 2010. 234-239. Disponivel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195925510001393>. Acesso em: 12 Fev. 2018.

BOCANEGRA, B. B. **Metodologia para Valoração Ambiental em Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) de Empreendimentos de Infraestrutura de Transportes Rodoviários**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Economia) Universidade de Brasília - UnB. Brasília, p. 151. 2017.

BRASIL. **Resolução CONAMA N. 001, de 17 de fevereiro de 1986. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental**. Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA. [S.l.]. 1986.

BRASIL. **Diretrizes Básicas para Estudos e Proejtos Rodoviários: escopos básicos / instruções de serviço**. Departamento de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Rio de Janeiro, p. 484. 2006.

BRASIL. **Terminlogias Rodoviárias Usualmente Utilizadas**. Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT. Rio de Janeiro, p. 17. 2007.

BRASIL. **Lei Nº 12.651, de 25 de maio de 2012**. **Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências**. 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm>. Acesso em: 15 Jan. 2018.

CÂMARA, G.; DAVIS JR, C. A. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS JR, C. A.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução a ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2014. Disponivel em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap1-introducao.pdf>. Acesso em: 25 Fev. 2018.

CAMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. [S.l.]: [s.n.], 2001. 344 p. Disponivel em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>. Acesso em: 05 Jan 2018.

CHAN, F. T. S.; CHAN, H. K. development of supplier selection model - a case study in the advanced technology industry. **Procedings of the Institutin of Mechanical Engineers**, v. 37, p. 1099-1119, 2003.

CNT. **Anuário CNT do Transporte - estatísticas consolidadas**. Confederação Nacional do Transporte - CNT. [S.l.], p. 229. 2017.

COLLISCHON, W. et al. Avaliação do desempenho de um algoritmo baseado no comportamento de formigas em problemas de caminho de mínimo custo em ambientes raster, 2008. Disponivel em: <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/view/325/315>. Acesso em: 05 Mar. 2018.

COSTA, R. M. **O Papel da Supervisão Ambiental e Proposta de Avaliação de Desempenho Ambiental em Obras Rodoviárias**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 351. 2010.

DER/PR. **Manual de instruções ambientais para obras rodoviárias**. Departamento de Estradas de Rodagem - DER. Curitiba, p. 246. 2000.

DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connection with graphs. **Numerische Mathematik**, 1959. 269-271. Disponivel em: <http://www-m3.ma.tum.de/foswiki/pub/MN0506/WebHome/dijkstra.pdf>. Acesso em: 15 Dez. 2017.

DNIT/STE. **Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) da Implantação, Pavimentação e Adequação da Capacidade com Melhoria de Segurança e Eliminação de Pontos Críticos em Segmentos da Rodovia BR-392/RS, Trecho Santa Maria - Santo Ângelo. 2013**. [S.l.]. Relatório técnico não publicado.

ESPERANDIO, I. B. **Rodovias atuam como barreira para o fluxo gênico de roedores subterrâneos? O caso de Ctenomys minutus**. Dissertação (Program de Pós-Graduação em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre. 2014.

ESRI. Arcgis 9.2 Desktop Help, 2007. Disponivel em: <http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?TopicName=welcome>. Acesso em: 07 Jan 2018.

ETHERINGTON, T. R. Least-cost modelling on irregular landscape graph. **Landscape Ecology**, 2012. 957-968. Disponivel em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs10980-012-9747-y>. Acesso em: 10 Jan. 2018.

FEOFILOFF, P; KOHAYAKAWA, Y; WAKABAYASHI, Y. **Uma Introdução sucinta à Teoria dos Grafos**. 2011. Disponivel em: <https://www.ime.usp.br/~pf/teoriados grafos/texto/TeoriaDosGrafos.pdf>. Acesso em: 15 Dez. 2017.

GALLARDO, A. L. C. F. **Análise das Praticas de Gestão Ambiental da Construção da Pista Descendente da Rodovia dos Imigrantes**. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, p. 322. 2004.

GARCIA, L. L. T. M. **Impacto de Condicionantes Hidrológicas na definição de Traçados Rodoviários: Aplicação na Rodovia TO-247**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. [S.l.]. 2011.

GARCÍA-RUIZ, J. M. et al. **A meta-analysis of soil erosion rates across the world**. [S.l.], p. 160-173. 2015.

GÓES, L. M. **Conservação e Grandes Empreendimentos de Infraestrutura no Litoral do Paraná: A Ferrovia Lapa-Paranapaguá**. Dissertação (Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento) - Univeridade Federal do Paraná. Curitiba, p. 122. 2014.

IBGE. **Mapa da vegetação do Brasil**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro. 2004. Escala 1:5.000.000.

LACERDA, A. F. **Análise e Estudo Comparativo da Escolha de Melhor Traçado para Mineroduto da Ferrous resources Brasil S/A**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Sistemas de Informação Geográfica) - Universidade Nova de Lisboa. [S.l.], p. 79. 2011.

LEITE, P. F.; KLEIN, R. M. **Vegetação. In:** IBGE. Rio de Janeiro: Geografia do Brasil: Região Sul, v. 2, 1990.

LIMA, R. M. **Otimização de traçado de linhas de transmissão por meio de avaliação multicritério e Sistema de Informações Geográficas (SIG)**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá/MG, p. 73. 2015.

LISBOA, M. V. **Contribuição para a Tomada de Decisão na Classificação e Seleção de Alternativas de Traçado para Rodovias em Trechos Urbanizados**.

Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 206. 2002.

LOPES, E. E. **Determinação de Traçados Geométricos de Obras Lineares Utilizando Análise Multicritério**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, p. 227. 2015.

MESQUITA, P. A. G. **Análise Multicritério e Análise de Percursos de Menor Custo Aplicadas ao Transporte de CO2 no Mediterrâneo Ocidental**. Dissertação. Instituto Superior de Estatística e Gestão da Informação da Nova Universidade de Lisboa. Lisboa. 2013.

MIRANDA, J. I. **Fundamentos de sistemas de informações geográficas**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 425 p. Disponivel em: <http://livraria.sct.embrapa.br/liv_resumos/pdf/00083790.pdf>. Acesso em: 10 Abr. 2018.

MMA. **Áreas Prioritárias para Conservação, Uso Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira: Atualização - Portaria MMA nº 9, de 23 de janeiro de 2007**. Ministério do Meio Ambiente - MMA. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Brasília. 2007.

MOURA, A. C. M. **Reflexões metodológicas como subsídio para estudos ambientais baseados em Análise de Multicritérios**. Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Florianópolis, p. 2899-2906. 2007.

PEREIRA, L. A. et al. **Aplicação da análise estatística multivariada para comparação entre os resultados do monitoramento da qualidade das águas superficiais obtidos a montante e jusante das obras de implantação da BR-448/RS - Rodovia do Parque**. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Anais. Porto Alegre. 2015.

PILLAR, J. V. **Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à decisão para Obras de Engenharia Civil: O caso do sistema de defesa contra inundações da cidade de Resistência, Argentina**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre. 2003.

QUEIROZ, F. T. et al. Gestão Ambiental em Obras Viárias: Estruturas e Resultados do Caso do Rodoanel Mario Covas, Trecho Sul. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade - RMS**, v. 4, 2014. ISSN 2318-3233. Disponivel em: <file:///C:/Users/Adriel/Downloads/271-2057-1-PB.pdf>. Acesso em: 05 Fev. 2018.

RAFAELI, L. **Análise de Envoltória de Dados como Ferramenta para Avaliação do Desempenho Relativo**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia

de Produção) - Univeridade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre. 2009.

ROSCOE, J. S. **A Internalização de Variáveis Ambientais nas Análises Custo-Benefício para Projetos Rodoviários: Utopia ou Realidade?** Dissertação (Mestrado em Economia) - Universidade de Brasília - UnB. Brasília. 2011.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill, 1991.

SAATY, T. L. **Theory and Applications of the Analytic Network Process:** Decision Making with Benefits, Opportunities, Costs, and Risks. Pittsburgh: RWS, 2005.

SAATY, T. L. Relative Measurement and its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors - The Analytic Hierarchy/Network Process, 2008. Disponivel em: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00576.PDF>. Acesso em: 12 Mar. 2018.
SALOMON, V. A. P.; SHIMIZU, T. Utilização de Matrizes de Julgamentos na Análise do Controle da Produção. **Gestão Industrial**, v. 2. n. 1, p. 69-77, 2006.

SAMPAIO, T. V. M. **Cartografia geral, digital e temática**. Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas. Universidade Federal do Paraná - (Série Geotecnologias: teoria e prática; v. 1). Curitiba, p. 210. 2018.

SÁNCHEZ, L. H. **Avaliação de Impacto Ambiental:** conceitos e métodos. 2. ed. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

SANTOS , O. P. **Optimização da localização de assembleias de voto em Angola recorrendo à ferramenta SIG**. Dissertação. Universidade de Lisboa. Lisboa. 2008.

SCHAFER, A. G. **Aplicação de Produtos Fotogramétricos e do Laser Scanner em Projetos Rodoviários - Estudo de Caso: Trecho da SC-414**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis, p. 130. 2004.

SILVA, A. N. **SIG: uma plataforma para introdução de técnicasemergentes no planejamento urbano, regional e de transportes: uma ferramenta 3D para análise ambiental urbana, avaliação multicritério, redes neurais artificiais**. São Carlos: Ed. dos Autores, 2004. 227 p.

SILVA, A. L; OLIVEIRA, L. M; ANDRADE, R. Q. **Metodologia baseada no Algoritmo de Dijkstra para roteirização de pontos turísticos em Ouro Preto**. 2010. Disponível

em: <http://www.saepro.ufv.br/wp-content/uploads/2010.2.pdf >. Acesso em: 05 Jan. 2018.

SIMONETTI, H. **Estudos de Impactos Ambientais Gerados pelas Rodovias: Sistematização do Processo de Elaboração do EIA/RIMA**. Monografia (Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre. 2010.

SORDYL, J. Application of the AHP Method to Analyze the Significance of the Factors Affecting Road Traffic Safety. **Transport Problems: an International Scientific Journal**, v. 10, p. 57-68, 2015.

SORDYL, J. Application of the AHP method to analyze the significance of the factors affecting road traffic safety. **Transport Problems: an International Scientific Journal**, v. 10, n. 2, p. 57-68, 2015.

TSUNOKAWA, K.; HOBAN, C. J. **Roads and the environment:** a handbook. Washington: World Bank technical paper, 1997. 228 p. Disponivel em: <http://documents.worldbank.org/curated/en/904041468766175280/pdf/multi-page.pdf>. Acesso em: 10 Fev 2018.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: Guia para Utilização de Dados**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. São José dos Campos, p. 72. 2008.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. Tese (Livre Docência em Geoprocessamento) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo - USP. Piracicaba, p. 151. 2006.

WEBER, E. et al. **Análise de Alternativas de Traçado em uma Estrada Utilizando Rotinas de Apoio à Decisão em SIG**. 1998. Disponivel em: <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/Publicacoes/Congressos/1998/Weber_et_al_1998_Analise_alternativas_rodovia_SIG.pdf>. Acesso em: 15 Jan 2018.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, p. 58. 1978.

APÊNDICE

APÊNDICE A - PESOS ABSOLUTOS DAS CLASSES DOS CRITÉRIOS

Os pesos das classes de cada critério (apresentados no Quadro a seguir) foram atribuídos através de procedimentos heurísticos, apoiados no conhecimento das características que descrevem os critérios conforme estudos semelhantes abordados no item 3.3. A definição heurística dos pesos tem como fator determinante a experiência pessoal, sendo que continua sendo amplamente aceita como base para sistemas especialistas, de modo particular em situações onde a teoria e os modelos empíricos de comportamento dos dados não estão bem estabelecidos.

MEIO	CRITÉRIO	CLASSE	DESCRIÇÃO	PESO ABSOLUTO
Físico	Declividade	1	0	3
	Declividade	2	1 - 3	1
	Declividade	3	3 - 8	1
	Declividade	4	8 - 20	1
	Declividade	5	20 - 45	5
	Declividade	6	> 45	7
	Tipo de solo	1	Argissolo	1
	Tipo de solo	2	Argissolo	1
	Tipo de solo	3	Argissolo	1
	Tipo de solo	4	Cambissolo	3
	Tipo de solo	5	Latossolo	1
	Tipo de solo	6	Latossolo	1
	Tipo de solo	7	Neossolo	5
	Tipo de solo	8	Neossolo	5
	Tipo de solo	9	Nitossolo	1
	Tipo de solo	10	Planossolo	7
	Hidrografia	1	0	5
	Hidrografia	2	Perene	7
	Hidrografia	3	Intermitente	5
	Hidrografia	4	Perene	9
	Hidrografia	Nodata	Nodata	1
	Potencial erosivo	1	< 10 (ton/ha.ano)	1
	Potencial erosivo	2	10 – 50 (ton/ha.ano)	3
	Potencial erosivo	3	50 – 200 (ton/ha.ano)	5
	Potencial erosivo	4	> 200 (ton/ha.ano)	7
Biótico	Vegetação	1	Contato savana - estepe	3
	Vegetação	2	Estepe	1
	Vegetação	3	Floresta	5
	APP	1	Vazio	5
	APP	2	Perene	7

MEIO	CRITÉRIO	CLASSE	DESCRIÇÃO	PESO ABSOLUTO
	APP	3	Intermitente	5
	APP	4	Perene	9
	APP	Nodata	Nodata	1
	APCB	0	Nodata	1
	APCB	1	Extremamente alta	7
	APCB	3	Muito alta	5
	APCB	4	Alta	3
Antrópico	Aproveitamento mineral	1	Autorização de pesquisa	2
	Aproveitamento mineral	2	Licenciamento	1
	Aproveitamento mineral	3	Registro de extração	1
	Aproveitamento mineral	4	Requerimento de lavra	3
	Aproveitamento mineral	5	Requerimento de licenciamento	3
	Aproveitamento mineral	6	Requerimento de pesquisa	5
	Aproveitamento mineral	7	Requerimento de registro de extração	3
	Aproveitamento mineral	Nodata	Nodata	Nodata
	Vias existentes	1	Estradas mun. sem pavimentação	1
	Vias existentes	2	Caminho/trilha	1
	Vias existentes	3	Rua	9
	Vias existentes	4	Ferrovia	9
	Vias existentes	5	Estradas mun. pavimentada	1
	Vias existentes	Nodata	Nodata	5
	Interferência em ferrovias	0	Nodata	1
	Interferência em ferrovias	1	Ferrovia	7
	UCS	1	Campo/pastagem	1
	UCS	2	Vegetação	7
	UCS	3	Área edificada	Nodata
	UCS	4	Cultivo irrigado	3
	UCS	5	Cultivo	3
	UCS	6	Hidrografia	9
	UCS	7	Silvicultura	3
	UCS	8	Predomínio de campo	1
	UCS	9	Predomínio de vegetação	5

APÊNDICE B - Critério Potencial Erosivo dos Solos

SUMÁRIO

1 METODOLOGIA 2
1.1 Equação Universal da Perda de Solo Revisada - RUSLE 2
1.1.1 Erosividade da Chuva - Fator R 2
1.1.2 Erodibilidade do Solo - Fator K 4
1.1.3 Fator do comprimento de rampa e declividade - Fator LS 6
1.1.4 Estimativa do Potencial Erosivo dos Solos 7
2 RESULTADOS 7
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 11

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do Potencial erosivo dos solos na AE 10

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características das estações pluviométricas utilizadas para o cálculo da erosividade das chuvas (Fator R) na AE 4
Quadro 2 - Característica das classes de solo da AE 5
Quadro 3 - Suscetibilidade à erosão segundo a proposta da FAO, UNEP e UNESCO 7
Quadro 4 - Fator R obtido para as estações pluviométricas utilizadas 8
Quadro 5 - Erodibilidade (Fator K) estimada para as classes de solo na AE 8

1 METODOLOGIA

A análise de vulnerabilidade à erosão na AE da Rodovia foi efetuada por intermédio da avaliação da perda de solo pela erosão bruta, estimada a partir da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo Revisada – RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*), conforme detalhado na sequência.

1.1 Equação Universal da Perda de Solo Revisada - RUSLE

A RUSLE é um modelo destinado a calcular a perda de solo proveniente de erosão laminar e por sulcos, não prevendo deposição, nem computando produção de sedimento por ravina e erosão das margens e fundo de canal. É constituída pelos fatores naturais de erosividade das chuvas, erodibilidade dos solos, geometria da encosta afetada, que não podem ser modificados facilmente, e por fatores influenciados diretamente pelo homem como uso, manejo e práticas conservacionistas. No estudo realizado considerou-se apenas as parcelas relativas a suscetibilidade natural à erosão, não sendo utilizados, portanto, os fatores referentes a interferência antrópica.

Embora a RUSLE seja uma equação empírica, tem grande aceitação e emprego por ter sido obtida a partir de 10.000 medições para as mais diversas condições de chuva e solos (WISCHMEIER e SMITH, 1978). Conforme o exposto, a perda de solo na AE foi determinada pela equação:

$$A = R \cdot K \cdot (L \cdot S)$$

Onde:

A = perda de solo por unidade de área e tempo (t/(ha.ano));

R = fator de erosividade da chuva, que expressa a erosão potencial, ou poder erosivo da precipitação média anual da região (MJ.mm/(ha.h.ano));

K = fator de erodibilidade do solo, que representa a capacidade do solo de sofrer erosão por uma determinada chuva (t.h/(MJ.mm));

LS = fator topográfico, representa o conjunto de comprimento de rampa e grau de declive (adimensional);

1.1.1 Erosividade da Chuva - Fator R

O fator R expressa a capacidade da chuva de causar erosão em uma área sem proteção, devido a desagregação e transporte das partículas de solo, ocasionada pelo

impacto direto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial da água juntamente com os sedimentos desagregados (PEREIRA, 2014).

Conforme a metodologia de Wischmeier e Smith (1978), uma das maneiras de expressá-la é através do índice de erosividade EI_{30}, que é o produto da energia cinética total da chuva pela intensidade máxima (mm/h), calculada para uma duração de 30 minutos. Para a definição do índice de erosividade, Wischmeier e Smith propõem a utilização de registros pluviográficos com séries que abranjam períodos superiores a 20 anos, no sentido de incluir variações cíclicas comuns aos parâmetros climáticos.

Porém, como os registros pluviográficos são escassos ou inexistentes em alguns países, incluindo o Brasil, diversos autores tentaram correlacionar o índice de erosão com fatores climáticos. Neste sentido, Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) ajustaram uma equação para determinação da erosividade considerando características brasileiras de precipitação, dada por:

$$R = \sum_{i-1}^{12} 89{,}823 \cdot \left(\frac{{P_m}^2}{P_a}\right)^{0{,}759}$$

Onde:

R = índice de erosão (MJ.mm/(h.ha.ano);

P_m = precipitação média mensal (mm); e

P_a = precipitação média anual (mm).

Para a determinação da erosividade das chuvas na AE, inicialmente foram levantadas as estações com dados pluviométricos monitorados diariamente, disponíveis no Sistema de Informações Hidrológicas da Agência Nacional de Águas - HIDROWEB (ANA, 2017), sendo identificadas oito (8) estações pluviométricas com dados consistidos, todas situadas no entorno da AE.

Para a seleção das estações a serem utilizadas, inicialmente foi definido como critério aquelas com 20 anos ou mais de dados pluviométricos monitorados diariamente, ainda que em períodos de observação distintos. No Quadro 4 a seguir estão relacionadas as estações pluviométricas e a série histórica utilizada. A partir destes valores geraram-se isolinhas por meio do método de interpolação de dados utilizando-se a ferramenta *spline* do *software* ArcGis 10.5.

Quadro 4 - Características das estações pluviométricas utilizadas para o cálculo da erosividade das chuvas (Fator R) na AE

Código da Estação	Município	Responsável*	Operadora**	Período	Coordenadas Geográficas (Datum Sirgas 2000)	
					Latitude	Longitude
2853005	Cruz Alta	INMET	INMET	1939-1998	-28,60344	-53,67360
2953017	Santa Maria	INMET	INMET	1939-1998	-29,72496	-53,72047
2954020	Santiago	ANA	CPRM	1976-2017	29,19160	-54,88565
3054018	São Gabriel	ANA	CPRM	1985-2017	-30,34144	-54,31091
2854011	São Luiz Gonzaga	INMET	INMET	1912-1998	-28,41711	-54,96240
2953030	Tupanciretã	ANA	CPRM	1976-2017	-29,08938	-53,82665
2753015	Palmeira das Missões	ANA	CPRM	1976-2017	-27,92038	-53,31805
2753007	Santo Augusto	ANA	CPRM	1948-2017	-27,85435	-53,79118

Fonte: ANA (2017). *ANA - Agência Nacional de Águas; INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

1.1.2 Erodibilidade do Solo - Fator K

A erodibilidade (Fator K) para cada tipo de solo pode ser fornecido ao modelo proposto, seja com base em valores publicados em estudos anteriores ou estimados utilizando equações como as encontradas em Wischmeier *et al*. (1971), Wischmeier e Smith (1978), Williams (1995) e Renard *et al*. (1997).

Entretanto, neste estudo estimou-se a erodibilidade dos solos da AE por meio da equação proposta por Williams (1995), que consiste no produto de quatro fatores dependentes da textura do solo e da concentração de carbono orgânico, conforme descrito a seguir:

$$K = 0{,}1317 * F_{arg} * F_{sil} * F_{areia} * F_{orgC}$$

Onde:

Fag = fator de areia grossa que fornece baixos valores de K para solos com grande quantidade de areia grossa e altos valores para solos com pouco areia;

Fcs = fator "argila-silte" que reduz o valor K para solos com elevada concentração de silte;

Forg = fator reduz o valor de K de solos com quantidades elevadas de carbono orgânico; e

Fareia = fator que reduz o valor de K de solos com elevada quantidade de areia.

Além de expressar o valor na unidade original do Fator k, utilizou-se a equação acrescentando o coeficiente 0,1317 para expressar a unidade, conforme o sistema métrico internacional, de acordo com Foster (1982). Os fatores foram calculados a partir da equação de Williams (1995):

$$F_{arg} = 0{,}2 + 0{,}3 * \exp\left[-0{,}256 * areia * \left(1 - \frac{silte}{100}\right)\right]$$

$$F_{sil} = \left(\frac{sil}{arg + sil}\right)^{0{,}3}$$

$$F_{areia} = 1 - \frac{0{,}7 * \left(1 - \frac{areia}{100}\right)}{\left(1 - \frac{areia}{100}\right) + exp\left[-5{,}51 + 22{,}9 * \left(1 - \frac{areia}{100}\right)\right]}$$

$$F_{orgC} = 1 - \frac{0{,}25 * orgC}{orgC + \exp(3{,}72 - 2{,}95 * orgC)}$$

Onde:

K = Fator de erodibilidade do solo (ton.h/(MJ.mm);

arg, silte, areia e orgC = porcentagem das respectivas frações minerais no horizonte superficial.

Os valores correspondentes às frações de areia, silte e argila de cada solo presente na AE foram obtidas de Streck. *et al.* (2008), resumidos no Quadro 5.

Quadro 5 - Característica das classes de solo da AE

Classe de Solo	Unidade Mapeamento	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Carbono org. (%)
Argissolo Amarelo alitico tipico	PBPe	74	4	22	1,4
Argissolo Bruno acinzentado alitico abruptico	PBPa	62	18	20	1,4
Argissolo Vermelho-amarelo distrofico	PEa	19	22	58	1,16
Cambissolo Háplico Ta eutrófico típico	Ce	34	41	25	2,6
Latossolo Vermelho distroferrico tipico	LRd	19	23	58	1,9
Latossolo Vermelho distrofico tipico	LEa	19	23	58	1,9
Neossolo Regolitico disrto-umbrico	Rd	55	24	21	2,4
Neossolo Regolitico humico leptico ou tipi	Re	26	44	30	2,2
Nitossolo Vermelho distroférrico típico*	TRe	13	25	62	0,4
Planossolo Háplico eutrófico arenico	PLe	70	16	14	0,67

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Streck. et al. (2008).

1.1.3 Fator do comprimento de rampa e declividade - Fator LS

Os fatores L e S são apresentados em conjunto e denominados “Fator Topográfico”. O comprimento do declive (L) representa a relação de perdas entre um declive de comprimento qualquer e um declive de 25m de comprimento do mesmo solo, mesmas características de chuva, mesmo grau de inclinação e sob mesmas condições de manejo. O Grau do declive (S) é a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9%, para as mesmas condições.

O cálculo do Fator L foi realizado a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) obtido junto ao Projeto TOPODATA[9] (VALERIANO e ROSSETTI, 2010), com resolução espacial do MDE de 30m, utilizando-se o algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996) a seguir.

$$LS = \frac{(A_{ij} + D^2)^{m+1} - (A_{ij})^{m+1}}{D^{m+2} x_{ij}^{m} (22{,}13)^{m}}$$

Os valores do expoente m da equação 1 é obtido a parti da equação a seguir.

$$m = \frac{\beta}{(1+\beta)}$$

Sendo beta o quociente entre a erosão em sulcos e entre sulcos supondo ser calculado conforme a equação (McCOOL *et al*., 1989):

$$\beta = \frac{\left(\frac{sen\theta}{0{,}0896}\right)}{(3(sen\theta)^{0{,}8} + 0{,}56)}$$

Onde:

Lij = fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (ij);

Aij = área de contribuição da célula com coordenada (i,j) (m^2);

D = tamanho da célula (m);

m = coeficiente função da declividade para a grade de célula com coordenada (i,j);

[9] Disponível para download no site do INPE (http://www.dsr.inpe.br/topodata/).

x = coeficiente em função do aspecto para a grade de célula com coordenada (i,j), obtido a partir da direção do fluxo acumulado;

O Fator S na RUSLE foi estimado pixel a pixel empregando a metodologia de McCool et al. (1987), de acordo com a equação:

$$S = 10{,}8 \sin\theta + 0{,}03 \quad \text{(para declividades <9\%)}$$
$$S = 16{,}8 \sin\theta - 0{,}50 \quad \text{(para declividades ≥9\%)}$$

Onde:

Θ = declividade da encosta em graus.

1.1.4 Estimativa do Potencial Erosivo dos Solos

A avaliação do potencial a erosão dos solos estimada na AE baseou-se na proposta de classificação apresentada pela *Food and Agriculture Organization* (FAO), pelo *United Nations Environment Programme* (UNEP) e *United Nations Educational Scientífic and Cultural Organization* (UNESCO), conforme o Quadro 6 a seguir.

Quadro 6 - Suscetibilidade à erosão segundo a proposta da FAO, UNEP e UNESCO

Perda de solo (ton.ha^{-1}.ano^{-1})	**Suscetibilidade à erosão**
<10	Baixa
10 - 50	Moderada
50 - 200	Alta
>200	Muito Alta

Fonte: Grupo Tragsa (1998). Adaptado de Pereira (2014).

2 RESULTADOS

A seguir são demonstrados os resultados obtidos para cada fator que integra o modelo RUSLE para determinar a perda de solo por erosão laminar na AE.

Fator R

A determinação da erosividade (Fator R) foi realizada utilizando-se os registros de dados de oito estações pluviométricas com dados consistidos a nível diário situadas no entorno da AE, com mais de 20 anos de monitoramento,

disponibilizados pela ANA. O valor anual da erosividade (Fator R) foi obtido para cada estação somando-se os valores de erosividade mensal (EI_{mensal}), conforme apresentado no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**.

Quadro 7 - Fator R obtido para as estações pluviométricas utilizadas

Código da Estação	Município	Responsável*	Operadora**	Período	Fator R
2853005	Cruz Alta	INMET	INMET	1939-1998	7147
2953017	Santa Maria	INMET	INMET	1939-1998	7023
2954020	Santiago	ANA	CPRM	1976-2017	7634
3054018	São Gabriel	ANA	CPRM	1985-2017	6456
2854011	São Luiz Gonzaga	INMET	INMET	1912-1998	7163
2953030	Tupanciretã	ANA	CPRM	1976-2017	7454
2753015	Palmeira das Missões	ANA	CPRM	1976-2017	7623
2753007	Santo Augusto	ANA	CPRM	1948-2017	7275

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fator K

A partir da classificação do solo obtida do Mapa de Solos da AE, determinaram-se os atributos físicos para cada classe. Para a determinação da erodibilidade de cada solo foram utilizados os valores correspondentes às frações de areia, silte e argila de cada solo presente na BHT obtidas de Streck. *et. al.* (2008), os quais foram aplicados por meio da equação proposta por Williams (1995).

Embora a granulometria exerça influência na resistência dos solos quanto à desagregação das partículas, convém ressaltar que a literatura de referência disponível sugere que apenas a utilização das frações granulométricas pode não ser suficiente para explicar a variação na erodibilidade do solo (BOYOUCOS, 1935; BERTONI e LOMBARDI NETO, 2008; ANGULO *et al*., 1994). Os resultados obtidos no estudo estão apresentados no Quadro 8.

Quadro 8 - Erodibilidade (Fator K) estimada para as classes de solo na AE

Classe de Solo	Unidade Mapeamento	K_{Rusle}	K
Argissolo Amarelo alitico tipico	PBPe	0,0852	0,0112
Argissolo Bruno acinzentado alitico abruptico	PBPa	0,1313	0,0173
Argissolo Vermelho-amarelo distrofico	PEa	0,1241	0,0163
Cambissolo Háplico Ta eutrófico típico	Ce	0,1315	0,0173
Latossolo Vermelho distroferrico tipico	LRd	0,1091	0,0144

Latossolo Vermelho distrofico tipico	LEa	0,1091	0,0144
Neossolo Regolitico disrto-umbrico	Rd	0,1245	0,0164
Neossolo Regolitico humico leptico ou tipi	Re	0,1342	0,0177
Nitossolo Vermelho distroférrico típico*	TRe	0,1534	0,0202
Planossolo Háplico eutrófico arenico	PLe	0,1532	0,0202

Fonte: Elaborado pelo autor a partir de Streck. et al. (2008).

Fator LS

Para o cálculo do fator topográfico LS foi gerada uma imagem raster de declividade da AE obtida pelo MDE, sendo em seguida cruzados os valores de declividade e comprimento de rampa médio para cada pixel por meio das equações propostas por Desmet e Govers (1996) e McCool et al. (1987).

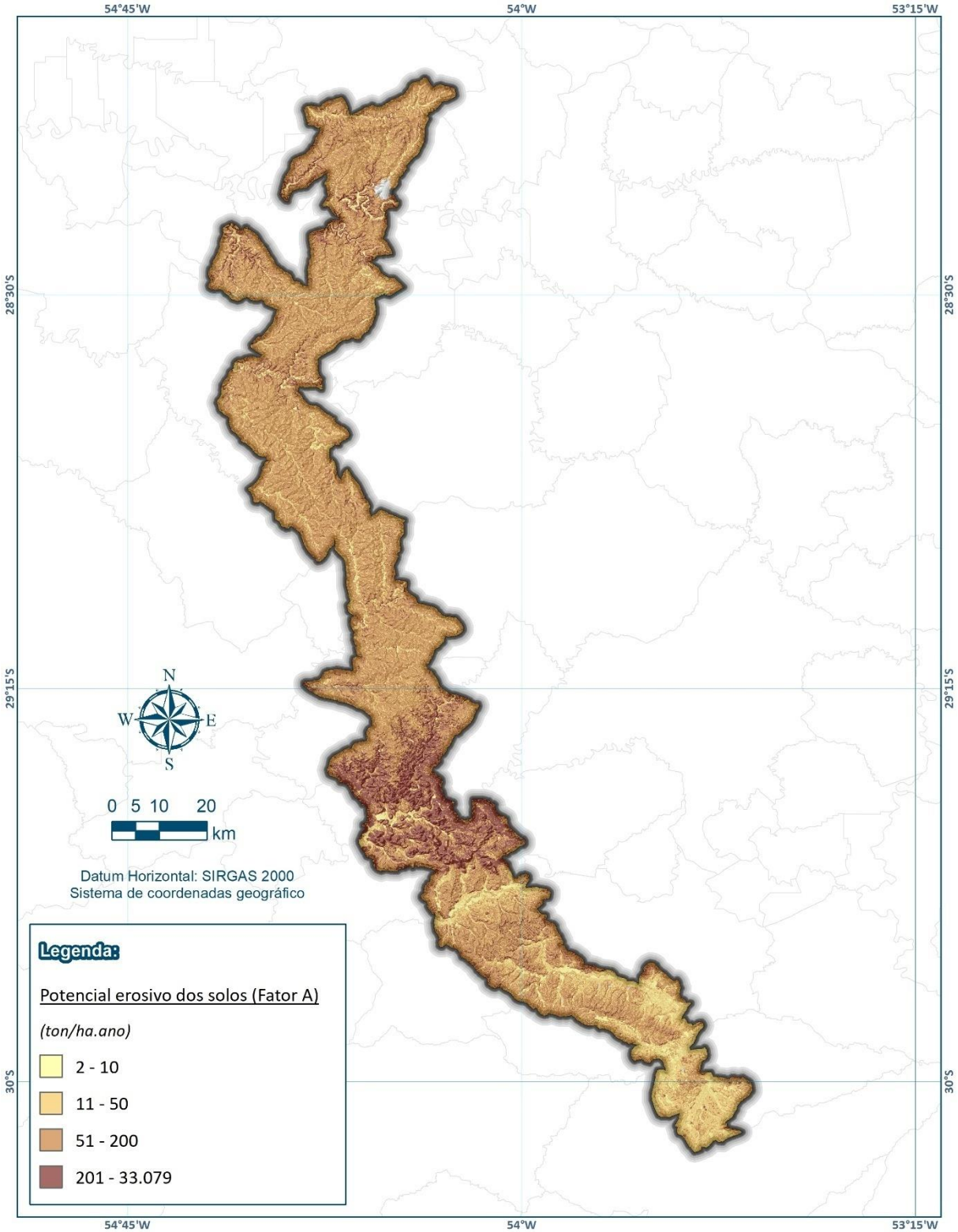
O fator LS merece especial atenção em sua determinação dentro do modelo RUSLE, pois constitui a base para a formação das diferentes magnitudes da energia potencial e cinética, referentes a atuação do escoamento superficial na erosão hídrica.

Os resultados obtidos indicam que as áreas de maior comprimento de rampa e declividade, as quais podem ter maior velocidade do escoamento superficial das águas, correspondem a formação dos processos erosivos mais intensos.

Fator A - Estimativa do Potencial de Erosão dos Solos

Para se estimar a perda do solo potencial devido à erosão hídrica na AE foram analisadas as diferentes variáveis ambientais influentes no processo, através da aplicação da RUSLE. A equação de perdas de solos demonstra a interação existente entre o solo e o relevo no potencial natural de erosão, confirmando o controle exercido pela erodibilidade (K), e pelo fator topográfico (LS), sendo este mais interferente em função da declividade. Na Figura 10 é apresentado o mapa de suscetibilidade do solo à erosão.

Figura 1 - Mapa do Potencial erosivo dos solos na AE



Fonte: Elaborado pelo autor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. Hidroweb. 2017. Disponível em: <http://www.hidroweb.ana.br>. Acesso em: 11 de dez. de 2017.

ANGULO, R.J.; ROLOFF, G.; SOUZA, M.L.P. Relações entre a erodibilidade e agregação, granulometria e características químicas de solos brasileiros. R, bras. ci. Solo, campinas, 8:133-138. 1984.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 6.ed. São Paulo: Ícone. 2008. 355p.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. Journal of Soil and Water Conservation, 51 (5): 427-433, 1996.

FAO, PNUMA E UNESCO, 1981. In: Métodos de Estimación de la Erosión Hídrica. Editorial Agrícola Española, S.A.. 1994. 152p

Grupo TRAGSA y Ministerio de Medio Ambiente. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ed. Mundi-prensa. España. 1998. 945 p.

FOSTER, G.R.; LANE, L.J. Beyound the USLE: advancements in soil erosion prediction. In: Boersma (ed.) Future developments in soil science research, Madison, Soil Sci. Am. Soc., p.315-326. 1982.

LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP). Bragantia, Campinas, 51(2):189-196, 1992.

MCCOOL, D.K., BROWN, L.C., FOSTER, G.R., MUTCHLER, C.K., MEYER, L.D. Revised slope steepness factor for the Universal Soil Loss Equation, Transactions of the ASAE, n. 30, 1387–1396, 1987.

McCOOL, D.K.; BROWN, L.C.; FOSTER, G.R.; MUTCHLER, C.K. & MEYER, L.D. Revised slope length factor for Universal Soil Loss Equation. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 32:1571-1576, 1989.

PEREIRA, J. S. Avaliação das Perdas de Solo por Erosão Laminar na Área de Influência da UHE Amadr Aguiar I. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. 2014.

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; McCOOL, D.K. & YODER, D.C. Predicting soil erosion by water – A guide to conservation planning with

Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, US Gov. Print Officie, 1997.

STRECK, E.V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R.S.D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P.C. do; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L.F.S. Solos do Rio Grande do Sul. 2.ed. rev. e ampl. Porto Alegre: Emater/RS, 2008. 222p.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. Disponível em: < http://mtc19.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19%4080/2010/05.10.18.35/doc/publicacao.pdf >. Acesso em 15 dez. 2017.

WILLIAMS, J.D.; DOBROWOLSKY, J.P.; WEST, N.E. Microphytic crust influence on interrill erosion and infiltration capacity. Trans. Am. Soc. Agric. Eng., 38:139-146, 1995.

WISCHMEIER, W.H; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J. soil Wat. Conserv. 26. 1971. p. 189-193.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington: USDA/ARS. 1978. 58p.

APÊNDICE C - QUESTIONÁRIOS

Abaixo são apresentados os questionários elaborados no estudo e aplicados aos Avaliadores para a obtenção dos pesos relativos referentes aos critérios considerados.

Avaliador: *Avaliador A*

Data da aplicação: *10/12/2017*

AVALIAÇÃO MÉTODO AHP - ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

Esta avaliação consiste numa proposta de análise multicritério integrada ao ambiente computacional SIG. A partir da utilização de algoritmos específicos pode-se obter um traçado otimizado para a implantação de uma rodovia, levando-se em conta a análise de diferentes critérios que compõem os meios físico, biótico e antrópico da área de estudo. Objetiva-se com esse estudo a definição de um traçado otimizado para a Rodovia BR-392, entre os municípios de Santo Ângelo e Santa Maria/RS, considerando a análise integrada de diferentes critérios (aspectos) com potencial de ocasionar impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes das futuras obras de implantação.

Como método multicritério será utilizada a Análise Hierárquica de Processos – AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process*), a qual permite uma avaliação entre critérios quando comparados par a par, obtendo-se a hierarquização destes de acordo com o grau de importância atribuído (pesos relativos).

Dessa forma, a abordagem metodológica adotada para este estudo permitirá a sistematização da entrada de dados no modelo computacional SIG a ser utilizado, combinando a análise dos dados geoespacializados referente aos diferentes meios e o julgamento de valor obtido a partir do método AHP.

No Quadro 1 a seguir são apresentados os critérios considerados para o estudo. Na sequência é apresentado o modelo de avaliação adotado para atribuição de pesos aos critérios e a ponderação de cada meio.

Quadro 1. Critérios definidos para o estudo.

Classificação do Meio	Critério	Breve descrição
Físico	Declividade	Classes de declividade
	Tipo de solo	Classificação das unidades de solos
	Interferência em águas superficiais	Sistema Hidrográfico (cursos d'água intermitentes, perenes e perenes principais das sub-bacias)
	Potencial erosivo dos solos	Classes de potencial erosivo baseado na RUSLE
Biótico	Fitofisionomias	Fitofisionomias vegetais
	Área de Preservação Permanente	APP geradas apenas para hidrografia
	Áreas Prioritárias para Conservação Biológica	Áreas prioritárias para a conservação dos biomas brasileiros
Antrópico	Uso e cobertura dos solos	Classificação do Uso e cobertura do Solo da AE
	Aproveitamento minerário	Requerimento minerário DNPM
	Vias existentes	Rede viária do RS
	Interferência em ferrovia	Vias ferroviárias

Metodologia Multicritério Análise Hierárquica de Processos - AHP

No Quadro 2 é apresentada a Escala Fundamental de Saaty[10] utilizada para a comparação dos critérios.

Quadro 2. Escala de Saaty (1991)[11].

Grau de Importância	Definição	Significado
1	Mesma importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Pequena importância de um sobre o outro	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério levemente em relação ao outro
5	Grande importância ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em ralação ao outro
7	Forte importância	Um critério é fortemente favorecido em relação ao outro e sua dominância pode ser verificada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação ao outro com grau de certeza mais elevado
2,4,6,8	Valores intermediários entre valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre dois critérios.

Exemplos de comparação par a par entre dois critérios e avaliação do grau de importância:

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério i			X															Critério j

Ex. 1: critério i tem “forte importância” para atingir o objetivo quando comparado ao critério j.

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério m											X							Critério n

Ex. 2: critério n tem “pequena importância” para atingir o objetivo quando comparado ao critério m.

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério i									X									Critério j

Ex. 2: os critérios tem “mesma importância” para atingir o objetivo.

[10] Segundo Saaty (1991), existe também o denominado limite psicológico, segundo o qual o ser humano pode, no máximo, julgar corretamente 7 + 2 pontos, ou seja, nove (9) pontos para distinguir essas diferenças.

[11] SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. São Paulo: McGraw-Hill. Makron, 1991.

Avaliação

1) Na avaliação pareada apresentada a seguir, qual critério é mais importante em relação ao outro para alcançar o objetivo do estudo? Marque um “X” na célula correspondente ao grau de importância (peso) do critério considerado mais relevante.

Objetivo: Definição do traçado ótimo para implantação da Rodovia, considerando a minimização dos impactos ambientais e socioeconômicos relativos aos meios físico, biótico e antrópico.

Quadro 3. Matriz de Avaliação dos Critérios - Avaliador A.

Meio	Critério i	Escala Fundamental de Saaty																	Critério j
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Físico	Tipo de relevo (declividade)									X									Tipo de solo
	Tipo de relevo (declividade)							X											Interferência em águas superficiais
	Tipo de relevo (declividade)													X					Potencial erosivo dos solos
	Tipo de solo					X													Interferência em águas superficiais
	Tipo de solo													X					Potencial erosivo dos solos
	Interferência em águas superficiais															X			Potencial erosivo dos solos
Biótico	Tipo de vegetação													X					Áreas de Preservação Permanente (APP)
	Tipo de vegetação											X							Áreas prioritárias para conservação
	Áreas de Preservação Permanente (APP)									X									Áreas prioritárias para conservação
Antrópico	Uso do solo									X									Aproveitamento mineral
	Uso do solo											X							Uso de vias existentes
	Uso do solo															X			Interferência em ferrovia
	Aproveitamento mineral							X											Uso de vias existentes
	Aproveitamento mineral															X			Interferência em ferrovia
	Uso de vias existentes															X			Interferência em ferrovia

Avaliador: *Avaliador B*

Data da aplicação: *10/12/2017*

AVALIAÇÃO MÉTODO AHP - ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

Esta avaliação consiste numa proposta de análise multicritério integrada ao ambiente computacional SIG. A partir da utilização de algoritmos específicos pode-se obter um traçado otimizado para a implantação de uma rodovia, levando-se em conta a análise de diferentes critérios que compõem os meios físico, biótico e antrópico da área de estudo. Objetiva-se com esse estudo a definição de um traçado otimizado para a Rodovia BR-392, entre os municípios de Santo Ângelo e Santa Maria/RS, considerando a análise integrada de diferentes critérios (aspectos) com potencial de ocasionar impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes das futuras obras de implantação.

Como método multicritério será utilizada a Análise Hierárquica de Processos – AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process*), a qual permite uma avaliação entre critérios quando comparados par a par, obtendo-se a hierarquização destes de acordo com o grau de importância atribuído (pesos relativos).

Dessa forma, a abordagem metodológica adotada para este estudo permitirá a sistematização da entrada de dados no modelo computacional SIG a ser utilizado, combinando a análise dos dados geoespacializados referente aos diferentes meios e o julgamento de valor obtido a partir do método AHP.

No Quadro 1 a seguir são apresentados os critérios considerados para o estudo. Na sequência é apresentado o modelo de avaliação adotado para atribuição de pesos aos critérios e a ponderação de cada meio.

Quadro 1. Critérios definidos para o estudo.

Classificação do Meio	Critério	Breve descrição
Físico	Declividade	Classes de declividade
	Tipo de solo	Classificação das unidades de solos
	Interferência em águas superficiais	Sistema Hidrográfico (cursos d'água intermitentes, perenes e perenes principais das sub-bacias)
	Potencial erosivo dos solos	Classes de potencial erosivo baseado na RUSLE
Biótico	Fitofisionomias	Fitofisionomias vegetais
	Área de Preservação Permanente	APP geradas apenas para hidrografia
	Áreas Prioritárias para Conservação Biológica	Áreas prioritárias para a conservação dos biomas brasileiros
Antrópico	Uso e cobertura dos solos	Classificação do Uso e cobertura do Solo da AE
	Aproveitamento minerário	Requerimento minerário DNPM
	Vias existentes	Rede viária do RS
	Interferência em ferrovia	Vias ferroviárias

Metodologia Multicritério Análise Hierárquica de Processos - AHP

No Quadro 2 é apresentada a Escala Fundamental de Saaty[12] utilizada para a comparação dos critérios.

Quadro 2. Escala de Saaty (1991)[13].

Grau de Importância	Definição	Significado
1	Mesma importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Pequena importância de um sobre o outro	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério levemente em relação ao outro
5	Grande importância ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em ralação ao outro
7	Forte importância	Um critério é fortemente favorecido em relação ao outro e sua dominância pode ser verificada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação ao outro com grau de certeza mais elevado
2,4,6,8	Valores intermediários entre valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre dois critérios.

Exemplos de comparação par a par entre dois critérios e avaliação do grau de importância:

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério i			X															Critério j

Ex. 1: critério i tem “forte importância” para atingir o objetivo quando comparado ao critério j.

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério m											X							Critério n

Ex. 2: critério n tem “pequena importância” para atingir o objetivo quando comparado ao critério m.

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério i									X									Critério j

Ex. 2: os critérios tem “mesma importância” para atingir o objetivo.

[12] Segundo Saaty (1991), existe também o denominado limite psicológico, segundo o qual o ser humano pode, no máximo, julgar corretamente 7 + 2 pontos, ou seja, nove (9) pontos para distinguir essas diferenças.

[13] SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. São Paulo: McGraw-Hill. Makron, 1991.

Avaliação

1) Na avaliação pareada apresentada a seguir, qual critério é mais importante em relação ao outro para alcançar o objetivo do estudo? Marque um “X” na célula correspondente ao grau de importância (peso) do critério considerado mais relevante.

Objetivo: Definição do traçado ótimo para implantação da Rodovia, considerando a minimização dos impactos ambientais e socioeconômicos relativos aos meios físico, biótico e antrópico.

Quadro 3. Matriz de Avaliação dos Critérios - Avaliador B.

Meio	Critério i	Escala Fundamental de Saaty																	Critério j
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Físico	Tipo de relevo (declividade)							X											Tipo de solo
	Tipo de relevo (declividade)						X												Interferência em águas superficiais
	Tipo de relevo (declividade)					X													Potencial erosivo dos solos
	Tipo de solo							X											Interferência em águas superficiais
	Tipo de solo					X													Potencial erosivo dos solos
	Interferência em águas superficiais										X								Potencial erosivo dos solos
Biótico	Tipo de vegetação													X					Áreas de Preservação Permanente (APP)
	Tipo de vegetação							X											Áreas prioritárias para conservação
	Áreas de Preservação Permanente (APP)			X															Áreas prioritárias para conservação
Antrópico	Uso do solo					X													Aproveitamento mineral
	Uso do solo															X			Uso de vias existentes
	Uso do solo													X					Interferência em ferrovia
	Aproveitamento mineral											X							Uso de vias existentes
	Aproveitamento mineral									X									Interferência em ferrovia
	Uso de vias existentes								X										Interferência em ferrovia

Avaliador: *Avaliador C*

Data da aplicação: *12/12/2017*

AVALIAÇÃO MÉTODO AHP - ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

Esta avaliação consiste numa proposta de análise multicritério integrada ao ambiente computacional SIG. A partir da utilização de algoritmos específicos pode-se obter um traçado otimizado para a implantação de uma rodovia, levando-se em conta a análise de diferentes critérios que compõem os meios físico, biótico e antrópico da área de estudo. Objetiva-se com esse estudo a definição de um traçado otimizado para a Rodovia BR-392, entre os municípios de Santo Ângelo e Santa Maria/RS, considerando a análise integrada de diferentes critérios (aspectos) com potencial de ocasionar impactos ambientais e socioeconômicos decorrentes das futuras obras de implantação.

Como método multicritério será utilizada a Análise Hierárquica de Processos – AHP (do inglês *Analytic Hierarchy Process*), a qual permite uma avaliação entre critérios quando comparados par a par, obtendo-se a hierarquização destes de acordo com o grau de importância atribuído (pesos relativos).

Dessa forma, a abordagem metodológica adotada para este estudo permitirá a sistematização da entrada de dados no modelo computacional SIG a ser utilizado, combinando a análise dos dados geoespacializados referente aos diferentes meios e o julgamento de valor obtido a partir do método AHP.

No Quadro 1 a seguir são apresentados os critérios considerados para o estudo. Na sequência é apresentado o modelo de avaliação adotado para atribuição de pesos aos critérios e a ponderação de cada meio.

Quadro 1. Critérios definidos para o estudo.

Classificação do Meio	Critério	Breve descrição
Físico	Declividade	Classes de declividade
	Tipo de solo	Classificação das unidades de solos
	Interferência em águas superficiais	Sistema Hidrográfico (cursos d'água intermitentes, perenes e perenes principais das sub-bacias)
	Potencial erosivo dos solos	Classes de potencial erosivo baseado na RUSLE
Biótico	Fitofisionomias	Fitofisionomias vegetais
	Área de Preservação Permanente	APP geradas apenas para hidrografia
	Áreas Prioritárias para Conservação Biológica	Áreas prioritárias para a conservação dos biomas brasileiros
Antrópico	Uso e cobertura dos solos	Classificação do Uso e cobertura do Solo da AE
	Aproveitamento minerário	Requerimento minerário DNPM
	Vias existentes	Rede viária do RS
	Interferência em ferrovia	Vias ferroviárias

Metodologia Multicritério Análise Hierárquica de Processos - AHP

No Quadro 2 é apresentada a Escala Fundamental de Saaty[14] utilizada para a comparação dos critérios.

Quadro 2. Escala de Saaty (1991)[15].

Grau de Importância	Definição	Significado
1	Mesma importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo
3	Pequena importância de um sobre o outro	A experiência e o julgamento favorecem levemente um critério levemente em relação ao outro
5	Grande importância ou essencial	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em ralação ao outro
7	Forte importância	Um critério é fortemente favorecido em relação ao outro e sua dominância pode ser verificada na prática.
9	Importância absoluta	A evidência favorece um critério em relação ao outro com grau de certeza mais elevado
2,4,6,8	Valores intermediários entre valores adjacentes	Quando se procura uma condição de compromisso entre dois critérios.

Exemplos de comparação par a par entre dois critérios e avaliação do grau de importância:

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério i			X															Critério j

Ex. 1: critério i tem “forte importância” para atingir o objetivo quando comparado ao critério j.

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério m											X							Critério n

Ex. 2: critério n tem “pequena importância” para atingir o objetivo quando comparado ao critério m.

Critério	**9**	8	**7**	6	**5**	4	**3**	2	**1**	2	**3**	4	**5**	6	**7**	8	**9**	**Critério**
Critério i									X									Critério j

Ex. 2: os critérios tem “mesma importância” para atingir o objetivo.

[14] Segundo Saaty (1991), existe também o denominado limite psicológico, segundo o qual o ser humano pode, no máximo, julgar corretamente 7 + 2 pontos, ou seja, nove (9) pontos para distinguir essas diferenças.

[15] SAATY, T. L. Método de Análise Hierárquica. São Paulo: McGraw-Hill. Makron, 1991.

Avaliação

1) Na avaliação pareada apresentada a seguir, qual critério é mais importante em relação ao outro para alcançar o objetivo do estudo? Marque um “X” na célula correspondente ao grau de importância (peso) do critério considerado mais relevante.

Objetivo: Definição do traçado ótimo para implantação da Rodovia, considerando a minimização dos impactos ambientais e socioeconômicos relativos aos meios físico, biótico e antrópico.

Quadro 3. Matriz de Avaliação dos Critérios - Avaliador C.

Meio	Critério i	Escala Fundamental de Saaty																	Critério j
		9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Físico	Tipo de relevo (declividade)				X									X					Tipo de solo
	Tipo de relevo (declividade)				X									X					Interferência em águas superficiais
	Tipo de relevo (declividade)	X									X								Potencial erosivo dos solos
	Tipo de solo				X									X					Interferência em águas superficiais
	Tipo de solo		X									X							Potencial erosivo dos solos
	Interferência em águas superficiais		X									X							Potencial erosivo dos solos
Biótico	Tipo de vegetação						X									X			Áreas de Preservação Permanente (APP)
	Tipo de vegetação					X									X				Áreas prioritárias para conservação
	Áreas de Preservação Permanente (APP)				X									X					Áreas prioritárias para conservação
Antrópico	Uso do solo		X									X							Aproveitamento mineral
	Uso do solo			X									X						Uso de vias existentes
	Uso do solo			X									X						Interferência em ferrovia
	Aproveitamento mineral							X									X		Uso de vias existentes
	Aproveitamento mineral					X									X				Interferência em ferrovia
	Uso de vias existentes			X									X						Interferência em ferrovia