



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ULISSES COSTA DE OLIVEIRA

**PROPOSTA METODOLÓGICA DE CÁLCULO DO VALOR DA MULTA
AMBIENTAL POR MEIO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E SISTEMAS DE
INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG)**

FORTALEZA

2023

ULISSES COSTA DE OLIVEIRA

PROPOSTA METODOLÓGICA DE CÁLCULO DO VALOR DA MULTA AMBIENTAL
POR MEIO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA (SIG)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

O52m Oliveira, Ulisses Costa de.
Proposta Metodológica de Cálculo do Valor da Multa Ambiental por Meio de Análise Multicritério e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) / Ulisses Costa de Oliveira. – 2023.
175 f.: il. color.

Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2023.

Orientação: Prof^a. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes.

1. Fuzzy DELPHI. 2. Fuzzy AHP. 3. Sistemas de Informação Geográfica. 4. Gravidade da Infração Ambiental. 5. Fiscalização Ambiental. I. Título.

CDD 628

ULISSES COSTA DE OLIVEIRA

PROPOSTA METODOLÓGICA DE CÁLCULO DO VALOR DA MULTA AMBIENTAL
POR MEIO DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E SISTEMAS DE INFORMAÇÃO
GEOGRÁFICA (SIG)

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento Ambiental.

Aprovada em: 24/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Profª. Dra. Samíria Maria Oliveira da Silva
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Ernane Cortez Lima
Universidade Estadual do Vale do Acaraú (UVA)

Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes (UFPA)
Universidade Federal do Pará (UFPA)

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar esta jornada desafiadora e enriquecedora que foi o meu doutorado, é com imenso respeito e gratidão que expresso minha sincera admiração e agradecimento às pessoas e instituições que foram fundamentais neste percurso.

Inicialmente, estendo minha gratidão à minha orientadora, Prof.^a Dr.^a. Ana Bárbara de Araújo Nunes, por me guiar nesta pesquisa, contribuindo para me moldar como pesquisador e indivíduo. Seu apoio inestimável foi essencial para a realização deste trabalho.

Um agradecimento ao corpo docente e aos membros do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, cujas aulas, discussões e sugestões enriqueceram significativamente minha formação acadêmica e pessoal. A cada um de vocês, minha sincera gratidão.

Um especial agradecimento aos membros da banca Prof. Dr. Fernando José Araújo da Silva, Profa. Dr.^a. Samíria Maria Oliveira da Silva, Prof. Dr. Ernane Cortez Lima e Prof. Dr. Lindemberg Lima Fernandes (UFPA) pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Não posso deixar de expressar minha gratidão aos meus colegas de trabalho da Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE, amigos e familiares. Aos meus colegas, pelo ambiente colaborativo e pelas discussões estimulantes. Aos meus amigos, pelo apoio constante e por me lembrarem da importância do equilíbrio entre a vida pessoal e acadêmica.

À minha família, meus pais e meu companheiro, meu mais profundo amor e gratidão. Seu apoio incondicional, compreensão e incentivo foram o alicerce emocional sem o qual este caminho teria sido imensamente mais difícil.

Agradeço também à Superintendência Estadual do Meio Ambiente - SEMACE pelo apoio que me foi dado para cursar o doutorado, cujo suporte foi fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Cada um de vocês teve um papel vital nesta jornada, e por isso, minha eterna gratidão.

“Mestre não é quem sempre ensina, mas quem de repente aprende.” (Riobaldo, personagem do livro "Grande Sertão: Veredas", de João Guimarães Rosa.)

RESUMO

A legislação vigente relativa à apuração de infrações cometidas contra o meio ambiente estabelece que a autuação ambiental deve se basear na tipologia de infração cometida devendo ser considerados o histórico de cometimento de infrações ambientais, a capacidade de pagamento e a gravidade da infração ambiental cometida. Nesse contexto, a presente pesquisa visou desenvolver uma metodologia de cálculo de multa ambiental embasada em um Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA utilizando análise multicritério e sistemas de informações geográficas para auxílio no processo de autuação por infrações cometidas contra o meio ambiente. A área objeto da aplicação proposta abrange o estado do Ceará, que possui uma área de 148.825,6 km² de extensão. Para isto, utilizou-se uma metodologia híbrida com a integração dos métodos *Fuzzy Delphi* (FDELPHI) e *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP). O método FDELPHI foi utilizado para levantar os critérios e subcritérios componentes do índice. O método FAHP foi utilizado para o cálculo dos pesos relativos dos critérios e subcritérios selecionados que contribuem para a estruturação do referido índice. Os resultados apontam que o Uso e Cobertura da Terra como o fator que mais contribuem para o índice, seguido dos critérios Distância de Recursos Hídricos, Declividade, Clima, Distância de Vias, Pedologia e Geologia. O IGIA foi dividido em cinco classes de gravidade (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta), tendo as classes baixa e média prevalecido sobre as demais classes. Os pesos atribuídos mostraram estabilidade e robustez ao serem submetidos a alterações. Com isso, por meio da modelagem matemática proposta, foi possível estruturar a metodologia para cálculo da multa ambiental baseada no modelo espacial da gravidade aliada à análise multicritério espacial.

Palavras-chave: FDELPHI; FAHP; sistemas de informação geográfica; gravidade da infração ambiental; fiscalização ambiental.

ABSTRACT

The current legislation related to the assessment of environmental infractions stipulates that environmental fines must be based on the type of infraction committed, considering the history of environmental infractions, the ability to pay, and the severity of the environmental infraction committed. In this context, this research aimed to develop a methodology for calculating environmental fines based on an Environmental Infraction Severity Index (EISI) using multi-criteria analysis and geographic information systems to assist in the process of fining for environmental infractions. The area of application proposed encompasses the state of Ceará, Brazil, which covers an area of 148,825.6 km². For this purpose, a hybrid methodology integrating the Fuzzy Delphi (FDELPHI) and Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) methods were used. The FDELPHI method was employed to identify the criteria and sub-criteria components of the index. The FAHP method was used for calculating the relative weights of the selected criteria and sub-criteria contributing to the structure of the said index. The results indicate that Land Use and Cover is the factor that contributes most to the index, followed by criteria such as Proximity to Water Resources, Slope, Climate, Proximity to Roads, Pedology, and Geology. The EISI was divided into five severity classes (very low, low, medium, high, and very high), with the low and medium classes prevailing over the others. The weights assigned demonstrated stability and robustness when subjected to changes. Thus, through the proposed mathematical modeling, it was possible to structure the methodology for calculating environmental fines based on the spatial model of severity combined with spatial multi-criteria analysis.

Keywords: FDELPHI; FAHP; geographic information systems; environmental infraction severity; environmental enforcement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Fluxo de aplicação da pena na Lei 9.605/1998.....	24
Figura 2	– Fluxo do procedimento de autuação administrativa, segundo o Decreto Federal 6.514/2008.....	29
Figura 3	– Métodos de valoração ambiental.....	34
Figura 4	– Estrutura conceitual de um Sistema de Informações Geográficas – SIG.....	38
Figura 5	– Estrutura hierárquica do problema de decisão.....	47
Figura 6	– Esquematização dos conceitos utilizados na aplicação da análise multicritério espacial.....	50
Figura 7	– Estrutura do modelo AHP espacial.....	58
Figura 8	– Esquema metodológico aplicado na tese.....	64
Figura 9	– Localização do Ceará.....	65
Figura 10	– Altimetria do estado do Ceará.....	66
Figura 11	– Compartimentação geoambiental do Ceará.....	68
Figura 12	– Mapa geológico simplificado do Ceará, com indicação das unidades litoestratigráficas.....	70
Figura 13	– Tipos climáticos do Ceará.....	71
Figura 14	– Classes de solo do Ceará.....	73
Figura 15	– Fluxograma para seleção dos critérios para compor o IGIA.....	79
Figura 16	– Procedimentos para ranqueamento dos critérios.....	82
Figura 17	– Desempenho dos critérios mantidos e rejeitados.....	93
Figura 18	– Classes de gravidade da infração ambiental por área e percentual.....	111
Figura 19	– Classes de gravidade em área (km ²) por bacias hidrográficas.....	113
Figura 20	– Índice de Gravidade da Infração Ambiental para o estado do Ceará.....	114
Figura 21	– Variação dos pesos dos critérios em função de mudanças percentuais.....	116
Figura 22	– Sensibilidade da variação dos pesos dos critérios e mudanças nas classes de gravidade.....	120
Figura 23	– Interface da Calculadora de Multa Ambiental.....	124

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	–	Correspondência entre infrações ambientais previstas no Decreto 6.514/2008 e crimes ambientais previstos na Lei 9.605/1998.....	26
Quadro 2	–	Taxonomia geral do valor econômico do recurso ambiental.....	33
Quadro 3	–	Comparação de Modelos de Decisão Multiatributo – MDMA e Modelos de Decisão Multiobjetivo – MDMO.....	50
Quadro 4	–	Perfil dos especialistas consultados.....	91
Quadro 5	–	Critério e siglas utilizados no trabalho.....	95
Quadro 6	–	Classes de uso e sua descrição.....	101
Quadro 7	–	Classificação dos portes das empresas e forma de cálculo do teto da multa ambiental.....	122

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Formas de relevo e declividade identificadas no Estado do Ceará.....	69
Tabela 2	– Classes de solo por áreas e percentual no estado do Ceará.....	72
Tabela 3	– Coeficientes de acordo com o PPD da atividade.....	76
Tabela 4	– Escala de valoração dos critérios.....	80
Tabela 5	– Variáveis linguísticas para comparação pareada de cada critério.....	83
Tabela 6	– Índice médio de consistência randômica (RI).....	85
Tabela 7	– Seleção e avaliação dos critérios através do método FDELPHI.....	92
Tabela 8	– Valores linguísticos atribuídos aos critérios pelo especialista 1.....	94
Tabela 9	– Valores linguísticos atribuídos aos critérios pelo especialista 1 convertidos em NFTs.....	94
Tabela 10	– Matriz agregada fuzzy das opiniões dos especialistas.....	94
Tabela 11	– Matriz de agregada fuzzy de pesos dos critérios convertido em crisp values.....	95
Tabela 12	– Critérios e pesos normalizados em ordem de importância.....	96
Tabela 13	– Estações pluviométricas por município, coordenadas e altitude, no período de 1981 a 2021.....	99
Tabela 14	– Classes de uso, valores de vulnerabilidade ambiental.....	102
Tabela 15	– Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas.....	104
Tabela 16	– Valores de vulnerabilidade/estabilidade dos solos.....	105
Tabela 17	– Classes de gravidade por intervalos.....	109
Tabela 18	– Estatísticas do IGIA para o Ceará.....	112
Tabela 19	– Medidas estatísticas para os valores de IGIA por bacia hidrográfica.....	112
Tabela 20	– Pesos dos critérios alterados.....	115
Tabela 21	– Áreas (km ² e %) das classes de gravidade em função da variação nos pesos.....	117
Tabela 22	– Transição de classes (km ²) para uma variação de +20% em relação aos pesos base.....	118
Tabela 23	– Transição de classes (km ²) para uma variação de -20% em relação aos pesos base.....	119
Tabela 24	– Tipos de infração, artigos, valores de multas (em R\$) e g _{max}	121

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	Questão e hipóteses da pesquisa.....	17
1.2	Objetivos.....	17
1.2.1	<i>Objetivo geral.....</i>	17
1.2.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	18
1.3	Organização do trabalho.....	18
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	19
2.1	Poder da polícia ambiental.....	19
2.2	A lei de crimes ambientais – Lei 9.605/1998.....	22
2.3	O Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008.....	25
2.4	Valoração econômica do dano ambiental.....	30
2.5	Modelos de representação e análise espacial por meio de Sistemas de Informação Geográfica.....	35
2.6	Análise multicritério espacial.....	43
2.7	Métodos de decisão multiatributo (ou multicritério) espacial – MDMAE.	51
2.7.1	<i>Combinação Linear Ponderada - CLP.....</i>	51
2.7.1.1	<i>Combinação Linear Ponderada - CLP.....</i>	51
2.7.1.2	<i>Combinação Linear Ponderada Ajustada pela Proximidade.....</i>	52
2.7.1.3	<i>Combinação Linear Ponderada Local.....</i>	53
2.7.2	<i>Média Ponderada Ordenada - MPO.....</i>	55
2.7.3	<i>Analytic Hierarchy Process - AHP.....</i>	56
2.8	Aplicação da teoria dos conjuntos <i>fuzzy</i> na análise multicritério espacial..	58
2.8.1	<i>Teoria dos conjuntos fuzzy.....</i>	58
2.8.2	<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process – FAHP.....</i>	60
3	METODOLOGIA.....	63
3.1	Descrição geográfica da área de aplicação.....	65
3.2	Desenvolvimento do modelo inicial.....	73
3.2.1	<i>Variáveis do modelo proposto.....</i>	76
3.2.1.1	<i>Potencial Poluidor-Degradador - p.....</i>	76
3.2.1.2	<i>Gravidade da infração ambiental - g.....</i>	77

3.3	Seleção e avaliação dos critérios componentes do Índice de Gravidade da Infração Ambiental (IGIA)	78
3.3.1	<i>Seleção dos critérios</i>	78
3.4	Cálculo dos pesos locais dos critérios.....	81
3.4.1	<i>Definição e estruturação do problema de decisão</i>	82
3.4.2	<i>Definição de um conjunto de termos linguísticos</i>	83
3.4.3	<i>Avaliação dos critérios e agregação das preferências dos k especialistas</i>	83
3.4.4	<i>Desfuzificação dos pesos fuzzy</i>	84
3.4.5	<i>Verificação de consistência</i>	84
3.4.6	<i>Definição dos pesos relativos dos critérios</i>	85
3.4.7	<i>Normalização dos pesos dos critérios</i>	85
3.5	Normalização dos critérios.....	86
3.6	Estruturação do Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA.....	87
3.7	Análise de sensibilidade.....	87
4	RESULTADOS OBTIDOS	89
4.1	Seleção dos critérios com base no método <i>Fuzzy-Delphi</i>	89
4.2	Cálculo dos pesos locais dos critérios.....	93
4.3	Normalização dos critérios.....	98
4.3.1	<i>Clima (Intensidade Pluviométrica)</i>	98
4.3.2	<i>Uso e cobertura da terra</i>	100
4.3.3	<i>Geologia</i>	103
4.3.4	<i>Pedologia</i>	104
4.3.5	<i>Declividade</i>	106
4.3.6	<i>Distância de vias</i>	107
4.3.7	<i>Distância de recursos hídricos</i>	108
4.4	Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA.....	108
4.5	Análise de sensibilidade.....	115
4.6	Modelo de cálculo da multa.....	121
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
5.1	Conclusões.....	125
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	126
	REFERÊNCIAS	127

APÊNDICE A – CRITÉRIOS SELECIONADOS COM BASE NA LITERATURA CONSULTADA.....	145
APÊNDICE B - CONSULTA FUZZY DELPHI PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE PARA ESTIMATIVA DA GRAVIDADE DO DA INFRAÇÃO AMBIENTAL.....	150
APÊNDICE C – IMPORTÂNCIA ATRIBUÍDA PELOS ESPECIALISTAS AOS CRITÉRIOS SELECIONADOS.....	153
APÊNDICE D - QUESTIONÁRIO FAHP PARA ESTRUTURAÇÃO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE DA INFRAÇÃO AMBIENTAL – IGIA...	156
APÊNDICE E - MATRIZES DE COMPARAÇÃO PAREADA DOS ESPECIALISTAS POR MEIO DAS VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS.....	161
APÊNDICE F - MATRIZES DE COMPARAÇÃO PAREADA DOS ESPECIALISTAS CONVERTIDAS EM NÚMEROS FUZZY TRIANGULARES.....	164
APÊNDICE G - MAPAS DOS CRITÉRIOS NORMALIZADOS.....	169

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, existe uma vasta legislação de proteção ambiental e de gestão ambiental, o que, aparentemente, poderia ser suficiente para garantir a preservação ambiental ou manejo de forma sustentável. Os administradores públicos cada vez mais são obrigados a decidir sobre assuntos complexos, em curtos espaços de tempo, o que pode gerar decisões equivocadas, além de o meio ambiente ser naturalmente objeto de incerteza e riscos (ANTONELLO, 2008).

Embora aparente ser algo nítido, o foco do interesse ambiental no processo de reparação de danos causados ao meio ambiente tem ficado em segundo plano, em grande parte, devido à falta de estrutura da Administração, tanto no aspecto administrativo como jurídico, para alcançar a complexidade do tema. A Constituição Federal de 1998 estabeleceu diversos instrumentos administrativos e jurídicos, visando o controle dos bens de interesse público, muitas vezes sem a clareza que a temática ambiental exige.

A complexidade do dano ambiental muitas vezes dificulta a fundamentação nos requisitos atinentes à sua responsabilização, assim como em se destacar a devida valoração do bem ambiental degradado (PAZ *et al.*, 2018). O dimensionamento da multa ambiental lavrada em função do cometimento de danos contra o meio ambiente é uma questão ainda a ser resolvida no âmbito dos órgãos ambientais. A legislação estabelece alguns fatores que devem ser considerados no cálculo da multa, porém, são muito vagos, dando margem excessiva à subjetividade no processo de lavratura de multas ambientais.

A valoração de infrações ambientais no contexto de órgãos ambientais difere da valoração ambiental de forma geral, pois a lei estabelece um piso e um teto para os valores, de acordo com a tipologia de dano cometido, ou seja, é estabelecido um intervalo de valores, onde devem ser considerados o histórico de cometimento de infrações ambientais, a capacidade de pagamento do autuado, traduzida, de forma geral, no seu porte, e a gravidade fatos, tendo em vista os motivos da infração e suas consequências para a saúde pública e para o meio ambiente (BRASIL, 1998), sendo a gravidade o objeto de estudo da presente proposta de trabalho, e que se configura o principal fator que influencia na mensuração da multa ambiental.

Atualmente, não se dispõe, no âmbito do dimensionamento da gravidade da infração ambiental, de uma metodologia clara que oriente os órgãos ambientais no exercício da atividade fiscalizatória, culminando, muitas vezes, em aplicações de sanções para danos ambientais e atividades equivalentes, em valores desproporcionais, quando comparados entre si, evidenciando a falta de critério na avaliação da gravidade, ficando a cargo da subjetividade do agente autuante essa análise.

A caracterização do dano e o dimensionamento de sua gravidade a partir de sua composição contribuem para o adequado dimensionamento das sanções ambientais em função do cometimento de infrações.

Nessa perspectiva, este trabalho justifica-se na medida em que propõe um aprimoramento na fiscalização ambiental através da proposição de uma metodologia de cálculo do valor da multa ambiental e dimensionamento da gravidade da infração ambiental, que viabiliza a justiça no processo de autuação, diminuindo a subjetividade do agente autuante quando do exercício do Poder de Polícia a ele delegado pelo Estado, considerando que os danos ambientais são passíveis de apuração de responsabilidade nas esferas administrativa, cível e criminal.

No exercício desse Poder de Polícia, a lavratura de autos de infração torna-se um processo bastante complexo e, muitas vezes, fere princípios de razoabilidade e proporcionalidade, em função da falta de referencial na decisão acerca da gravidade da infração ambiental e o valor atribuído à multa na autuação.

A originalidade da presente proposta de trabalho centra-se na proposição de um modelo espacial de mensuração da gravidade da infração ambiental como subsídio à valoração de infrações ambientais, apoiado na tomada de decisões. O trabalho permitirá o aprimoramento da gestão ambiental no contexto de órgãos ambientais, na medida em que será criada uma metodologia que baliza o processo de tomada de decisão quanto à gravidade da infração ambiental no contexto das multas ambientais lavradas.

Assim, pretende-se, com esta metodologia, subsidiar o trabalho de profissionais, técnicos, especialistas, gestores e estudiosos da área para uma visão multicritério na gestão ambiental. Dessa forma, o processo de mensuração da gravidade da infração ambiental, como componente da autuação ambiental poderá contar com uma maior precisão nas informações, fortalecendo a transparência no exercício da atividade de fiscalização ambiental.

Para enfrentar o problema dos objetivos conflitantes devido a múltiplos propósitos e partes interessadas, o uso de um método que acrescenta estrutura, auditabilidade, transparência e rigor ao processo de tomada de decisão (SANTL; STEINMAN, 2015), como a análise multicritério, é fortemente necessário (VASSONEYA; MOCHETB; COMOGLIO, 2016).

A proposição de uma metodologia de cálculo da multa ambiental embasada em um Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA proporcionará o aperfeiçoamento dos mecanismos de dimensionamento dos valores a serem calculados no momento da autuação.

1.1 Questão e hipóteses da pesquisa

A partir do que foi apresentado no tópico anterior é possível propor a questão de pesquisa a ser tratada neste trabalho, a partir da qual é desenvolvida a tese.

A Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998, define para imposição e gradação da penalidade a ser aplicada, que deverão ser observados como critérios a gravidade do fato, os antecedentes do infrator e sua situação econômica, no caso de multa. Da mesma forma, o Decreto 6.514, de 22 de julho de 2008 impõe ao agente autuante que ao lavrar o auto de infração observe os mesmos critérios.

Dos critérios apresentados pela legislação, a gravidade do fato está relacionada ao grau que a conduta relacionada aos aspectos ambientais da atividade pode causar de prejuízo ambiental quando em interação com as características do meio ambiente. Essa premissa deve ser levada em conta no momento da autuação, já que cada ambiente processa uma alteração de maneira específica.

Nesse sentido, a questão de pesquisa passa a ser: Como desenvolver uma metodologia que permita levar em conta a gravidade do fato em função dos aspectos ambientais da atividade e das características do ambiente onde ela ocorre, de modo a estruturar uma ferramenta de cálculo de multa ambiental?

Na presente tese, as hipóteses propostas em relação à questão são:

- A construção do Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGDA pode embasar de forma objetiva o cálculo de multas por danos cometidos contra o meio ambiente;
- Os métodos de análise multicritério espacial podem ser utilizados na priorização de alternativas para contribuir no dimensionamento da gravidade da infração ambiental.

Dessa forma, expostos a questão de pesquisa e as hipóteses de solução para a questão proposta, apresentam-se os objetivos do presente trabalho na seção seguinte.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Propor uma metodologia de cálculo de multa ambiental embasada em um Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA utilizando análise multicritério e sistemas de informações geográficas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um modelo de cálculo de multa ambiental com base na gravidade da infração ambiental e no potencial poluidor-degradador da atividade;
- Selecionar um conjunto de critérios mais relevantes ao contexto de avaliação da gravidade de infrações ambientais utilizando o método *Fuzzy DELPHI*;
- Definir os níveis de importância dos critérios selecionados por meio de método multicritério *Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP)*;
- Desenvolver um modelo espacial multicritério para estruturar um Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA, a partir dos critérios selecionados.

1.3 Organização do trabalho

A tese foi desenvolvida em cinco capítulos. O Capítulo 1, denominado **INTRODUÇÃO**, inicia o trabalho abordando a temática de maneira ampla, apresenta a questão e hipóteses da pesquisa, além de seus objetivos geral e específicos.

O Capítulo 2, intitulado **REVISÃO DA LITERATURA**, aborda os conceitos e teorias trabalhados, abrangendo a legislação que trata do tema, métodos de valoração e análise multicritério espacial.

O Capítulo 3, referente à **METODOLOGIA**, abrange a proposta metodológica do modelo de cálculo da multa ambiental e da estruturação do Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA, além de apresentar a área de aplicação, que compreende o Estado do Ceará, localizado no Nordeste do Brasil, com uma área de 148.825,6 km² de extensão.

O Capítulo 4, destinado aos **RESULTADOS OBTIDOS**, discutiu os resultados obtidos na proposição do IGIA, bem como na sua aplicação e avaliação.

O Capítulo 5 trata das **CONSIDERAÇÕES FINAIS**. Traz as conclusões e algumas considerações relativas aos resultados alcançados, seguido pelas **REFERÊNCIAS** utilizadas nesta tese.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Poder de Polícia Ambiental

A convivência em sociedade exige que o Estado regule as interações entre as pessoas através de normas que orientam seus comportamentos, estabelecendo deveres, direitos e responsabilidades em prol do interesse coletivo. De acordo com Sanchez (2020), dentre as diversas funções do Estado está o poder de polícia, através do qual a fiscalização ambiental atua como um instrumento de acompanhamento dos impactos ambientais que cabe ao setor público.

A atuação do estado na defesa do meio ambiente é decorrente do artigo 225 da Constituição de 1988, que impõe “ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações” (BRASIL, 1988).

A base da responsabilidade administrativa no âmbito ambiental reside no poder de polícia, que consiste na competência atribuída ao Poder Público para regular ou limitar atividades individuais em prol do interesse coletivo. O conceito legal de poder de polícia foi trazido pelo Código Tributário Nacional - CTN, em seu artigo 78, que o define da seguinte forma:

Considera-se poder de polícia a atividade da administração pública que, limitando ou disciplinando direito, interesse ou liberdade, regula a prática de ato ou abstenção de fato, em razão de interesse público concernente à segurança, à higiene, à ordem, aos costumes, à disciplina da produção e do mercado, ao exercício de atividades econômicas dependentes de concessão ou autorização do Poder Público, à tranquilidade pública ou ao respeito à propriedade e aos direitos individuais ou coletivos (BRASIL, 1966).

Além disso, no parágrafo único do art. 78, o CTN aborda o que considera regular exercício do poder de polícia, considerando “regular o exercício do poder de polícia quando desempenhado pelo órgão competente [...] com observância do processo legal e, tratando-se de atividade que a lei tenha como discricionária, sem abuso ou desvio de poder.”

Como enfatiza Milaré (2020), o poder de polícia é uma prerrogativa da Administração Pública, que justifica a intervenção na esfera jurídica do indivíduo em prol de interesses mais amplos e relevantes para a sociedade, desde que embasado em legislação prévia que estabeleça e delinieie seus limites.

Segundo Carvalho Filho (2008), “o Poder Público, ao interferir na órbita do interesse privado para salvaguardar o interesse público, restringindo direitos individuais, está atuando no exercício do poder de polícia” que, nas palavras de Amado (2017), surge da exigência pública de restringir o abuso no exercício de direitos individuais, com o objetivo de

alinhá-los aos interesses coletivos, uma vez que não há direitos absolutos, devendo a aplicação desse poder ser orientada pelos princípios da adequação, necessidade e proporcionalidade em sentido estrito.

O poder de polícia ambiental consiste na tutela da Administração Pública sobre as atividades efetiva ou potencialmente poluidoras, tendo em vista o direito fundamental ao meio ambiente ecologicamente equilibrado (FARIAS; COUTINHO; MELO, 2015), visa defender, além de preservar os bens ambientais não só para as presentes, mas também para as futuras gerações (FIORILLO, 2013; 2020).

É responsabilidade do Estado, por meio do exercício de seu poder de polícia, supervisionar e guiar os indivíduos em relação aos limites para o uso do meio ambiente. O Estado deve conscientizá-los sobre a relevância de considerar sempre o bem-estar coletivo e, além disso, promover acordos de ajustamento de conduta com o objetivo de encerrar atividades prejudiciais ao meio ambiente (GARCIA; THOMÉ, 2016).

Assim, o poder de polícia trata da atividade estatal que limita o exercício de direitos individuais em favor do bem público. E esta atividade é materializada através da atuação da fiscalização ambiental, através dos órgãos ambientais, que exercem o poder de polícia por meio de ações fiscalizatórias, que envolvem medidas preventivas, de monitoramento, inspeção, advertência, punição e correção, dentre outras.

A fiscalização ambiental é uma atividade fundamental para garantir o cumprimento das leis e regulamentos que visam proteger o meio ambiente. De acordo com Maria (2019), a fiscalização ambiental configura um instrumento de gestão ambiental exercida pelo poder público que consiste em verificar o cumprimento das normas ambientais e a aplicar as sanções administrativas quando não houver conformidade, atuando assim de maneira preventiva e repressiva às transgressões, sendo seu exercício, segundo Gibson (2006), calcado nas preocupações crescentes sobre o impacto humano no meio ambiente e na necessidade de adotar práticas sustentáveis.

Schmitt (2015) argumenta que a fiscalização ambiental é uma atividade exercida pelo poder público que tem como objetivo verificar o cumprimento da legislação ambiental. Caso haja não conformidade, a fiscalização aplica as sanções administrativas cabíveis, atuando de maneira preventiva e repressiva às transgressões. Trata-se de uma atividade fundamental para garantir a proteção do meio ambiente e assegurar a qualidade de vida da população, uma vez que contribui para coibir ações prejudiciais ao equilíbrio ecológico e à saúde humana.

A fiscalização ambiental pelos órgãos estatais desempenha papel relevante na imposição de freios à poluição a fim de garantir o atendimento de referidos direitos. A

observação dos impactos da omissão estatal em fiscalizar, nessa sistemática, também é relevante (ALVES; FRANÇA, 2020).

Os órgãos ambientais com poder de polícia são aqueles responsáveis pela emissão de atos administrativos autorizativos, pela fiscalização e pela imposição de sanções administrativas ambientais, seja em âmbito federal, estadual, distrital ou municipal (FARIAS; COUTINHO; MELO, 2015).

Nesse contexto, Silva (2015) argumenta que a fiscalização das atividades utilizadoras de recursos naturais e a aplicação de penalidades disciplinares ou compensatórias àqueles que não preservam ou não recuperam o meio ambiente degradado constituem instrumentos fundamentais da Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA.

A Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, criou a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA, que tem por objetivo “a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar, no País, condições ao desenvolvimento socioeconômico, aos interesses da segurança nacional e à proteção da dignidade da vida humana.” Para isto, previu como um dos seus instrumentos “as penalidades disciplinares ou compensatórias ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental”, que serão aplicadas por meio da atuação dos órgãos componentes do Sistema Nacional de Meio Ambiente – SISNAMA, quais sejam, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e dos órgãos estaduais e municipais competentes (BRASIL, 1981).

Esses órgãos figuram como responsáveis pela apuração de infrações administrativas, bem como pela aplicação das penalidades (sanções administrativas) a elas relacionadas por meio do exercício do poder de polícia ambiental. Nesse contexto, conforme destacam Gomes e Maciel (2015), o meio ambiente é um bem jurídico que deve ser protegido pelo direito penal, como determinado pela Constituição, importando destacar que a proteção penal deve ser adequada e necessária, de acordo com o princípio da proporcionalidade.

Nesse contexto, assim como outras Constituições modernas, a Constituição Federal de 1988 dedicou um capítulo inteiro para proteger e preservar o meio ambiente. Além disso, diversas outras normas foram estabelecidas no texto constitucional para tratar desse tema crucial, que é um bem jurídico fundamental para a vida das atuais e futuras gerações. A conservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável são essenciais para garantir uma qualidade de vida saudável e para a própria sobrevivência do planeta e da humanidade (GOMES; MACIEL, 2015).

Diante disso, é nítida a exigência de, no exercício do poder polícia ambiental, ou seja, da fiscalização ambiental, que as decisões na aplicação das sanções que resultam em multas, por exemplo, sejam embasadas em critérios objetivos, que levem em consideração a natureza do empreendimento e do ambiente afetado, bem como a capacidade de o infrator arcar economicamente com os custos imputados pela punição.

2.2 A lei de crimes ambientais - Lei 9.605/1998

A Lei 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 (BRASIL, 1998), mais conhecida como Lei de Crimes Ambientais (LCA), estabeleceu medidas administrativas e penais para as ações que prejudicam o meio ambiente, em conformidade com a determinação constitucional mencionada. Anteriormente, o sistema jurídico-penal referente ao meio ambiente era caracterizado pela existência de muitas leis desconexas, o que gerava mais incerteza do que proteção para esse importante interesse jurídico. A LCA foi capaz de organizar e reunir as violações penais contra o meio ambiente em um único conjunto legal, embora haja ainda outras infrações ambientais definidas em outros textos normativos.

A Lei de Crimes Ambientais está estruturada em oito capítulos, os quais tratam das disposições gerais, em seu primeiro capítulo, trazendo a possibilidade de aplicação das sanções contra pessoas físicas e pessoas jurídicas, podendo esta última ser desconsiderada nos casos em que “sua personalidade for obstáculo ao ressarcimento de prejuízos causados à qualidade do meio ambiente” (BRASIL, 1998).

Fiorillo (2020) afirma que as disposições gerais da Lei n. 9.605/1998 configuram fundamental evolução no sentido de trazer utilidade aos cidadãos por meio de proteção da vida com a utilização das sanções penais ambientais.

Em seu Capítulo II, a LCA estabeleceu as condições para aplicação das penas (art. 6º), devendo ser observados pela autoridade competente a gravidade do fato, tendo em vista os motivos da infração e suas consequências para a saúde pública e para o meio ambiente; os antecedentes do infrator quanto ao cumprimento da legislação de interesse ambiental; e a situação econômica do infrator, no caso de multa.

O legislador adotou critérios estritamente constitucionais ao estabelecer grande parte das penas fixadas no artigo 5º, XLVI, da Constituição Federal. As penas de prestação de serviços à comunidade (art. 9º), de interdição temporária de direitos (art. 10), de suspensão de atividades (art. 11), de prestação pecuniária (art. 12) e até mesmo de recolhimento domiciliar (art. 13) representam meras aplicações concretas dos princípios estabelecidos na Constituição

Federal, os quais constituem as bases do direito penal constitucional.

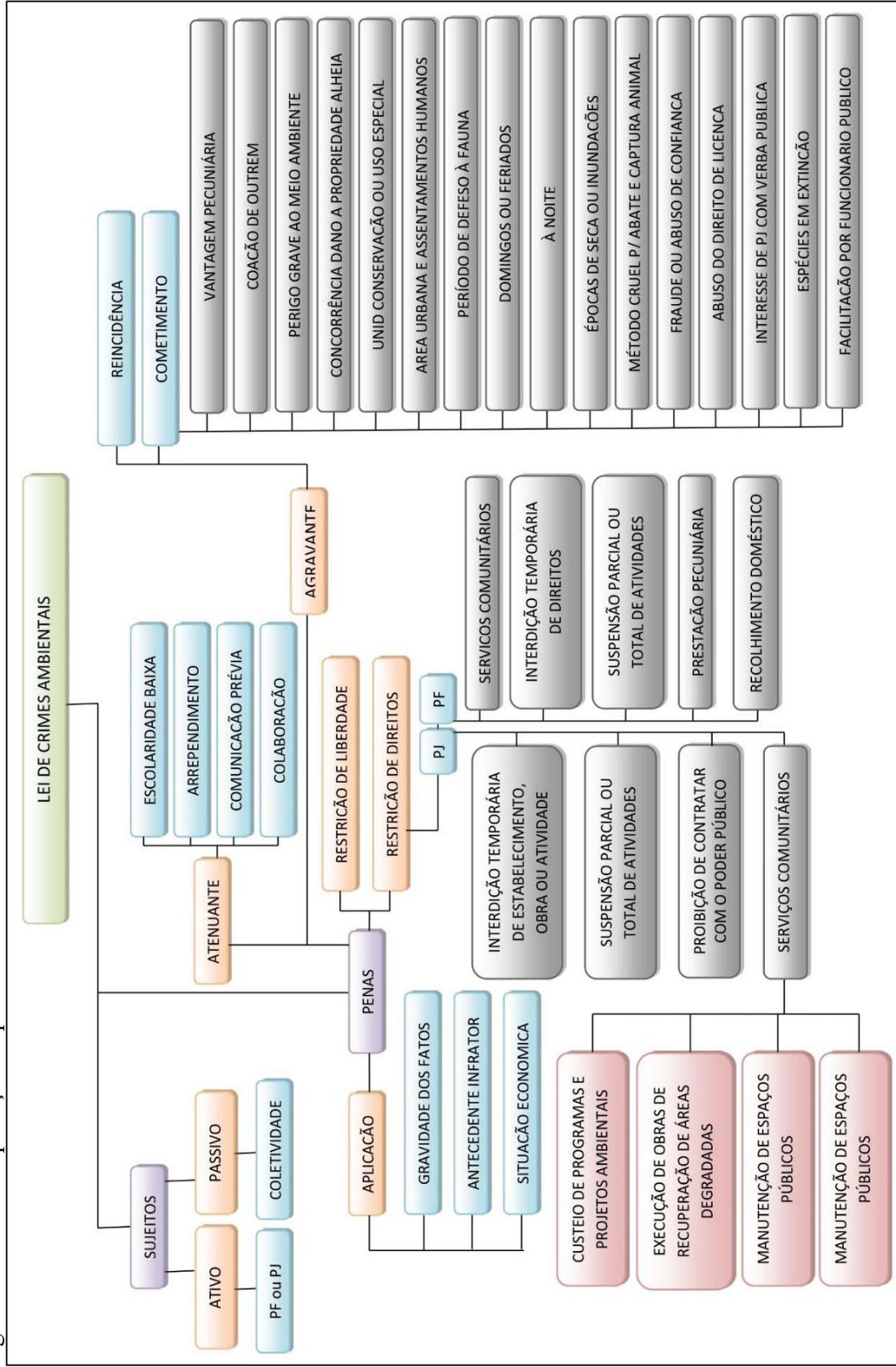
Com relação às circunstâncias atenuantes (art. 14) e agravantes da pena (art. 15), o legislador levou em conta as peculiaridades do direito ambiental em vigor, destacando, em particular, a importância da definição de critérios adaptados à realidade brasileira, destacando-se o baixo grau de instrução ou escolaridade do agente (art. 14, I) e arrependimento do infrator (art. 14, II) no que se refere às circunstâncias que podem levar a uma redução da pena. Quanto aos agravantes, listam-se como exemplos as alíneas “c”, “f” e “j” do inciso II do art. 15. O esquema mostrado na Figura 1 mostra detalhadamente o fluxo disposto no Capítulo II da LCA no processo de aplicação da pena com os agravantes e atenuantes.

O Capítulo III da Lei de Crimes Ambientais trata da apreensão do produto e do instrumento de infração administrativa ou de crime (art. 25), estabelecendo que, após a constatação de infração, os produtos e instrumentos utilizados serão apreendidos e lavrados os respectivos autos. Os animais apreendidos devem ser libertados em seu habitat ou entregues a jardins zoológicos, fundações ou entidades assemelhadas. Enquanto isso, devem ser mantidos em condições adequadas. Produtos perecíveis ou madeiras serão avaliados e doados a instituições beneficentes, enquanto produtos não perecíveis serão destruídos ou doados a instituições científicas, culturais ou educacionais. Os instrumentos utilizados serão vendidos com a garantia de descaracterização por meio da reciclagem.

O Capítulo IV da LCA apresenta as disposições legais referentes à ação penal em infrações penais ambientais, sendo a ação penal a ser impetrada pública incondicionada, o que significa que o Ministério Público é o responsável pela investigação e pela condução do processo criminal, sem que haja a necessidade de autorização ou concordância da vítima ou de qualquer outra pessoa. O capítulo V trata dos crimes contra o meio ambiente, que podem ser classificados em:

- Crimes contra a Fauna (arts. 29 a 37): têm como objeto jurídico a fauna silvestre, terrestre e aquática. Na proteção incluem-se todos os animais (selvagens, domésticos, domesticados, nativos e exóticos) em qualquer fase de desenvolvimento, englobando ovos, larvas, filhotes e adultos (GOMES; MACIEL, 2015);
- Crimes contra a Flora (arts. 38 a 53): têm como objeto jurídico a totalidade das espécies vegetais que compreendem a vegetação de uma determinada região sem qualquer expressão de importância individual. Compreende também algas e fitoplânctons marinhos flutuantes. A flora se organiza geralmente em estratos, que determinam formações específicas como campos e pradarias, savanas e estepes, bosques e florestas, e outros (Milaré, 2020);

Figura 1 - Fluxo de aplicação da pena na Lei 9.605/1998



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Poluição e outros Crimes Ambientais (arts. 54 a 61): têm como objeto jurídico o meio ambiente e a incolumidade pública, tutelando, além do meio ambiente, outros bens jurídicos humanos. Nesta categoria de crime incluem-se a poluição, pesquisa, lavra ou extração de recursos minerais, a produção, o processamento, a embalagem, a importação, a exportação, a comercialização, o fornecimento, o transporte, o armazenamento, o depósito e o uso de produtos ou suprimentos tóxicos, perigosos ou nocivos à saúde humana ou ao meio ambiente (BRASIL, 1998);
- Crimes contra o Ordenamento Urbano e o Patrimônio Cultural (arts. 62 a 65): têm como objeto jurídico o que inclui o meio ambiente artificial e o cultural. O meio ambiente artificial é o construído pelo homem composto pelo espaço urbano fechado (edifícios, casas, clubes etc.) e pelo espaço urbano aberto (praças, avenidas, ruas etc.). O patrimônio cultural é aquele previsto no art. 226 da CF/88;
- Crimes contra a Administração Ambiental (arts. 66 a 69): têm como objeto jurídico proteger o meio ambiente ao punir condutas que atentem contra a fiscalização, a gestão e o controle ambiental.

Em seu capítulo VI, a LCA aborda as infrações administrativas ambientais, definindo-as como toda ação ou omissão que viole as regras jurídicas de uso, gozo, promoção, proteção e recuperação do meio ambiente, além de definir as autoridades competentes para lavrar auto de infração ambiental e instaurar processo administrativo, quais sejam, os funcionários de órgãos ambientais integrantes do Sistema Nacional de Meio Ambiente - SISNAMA, bem como os agentes das Capitânicas dos Portos, do Ministério da Marinha.

A Lei de Crimes Ambientais foi regulamentada pelo Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008 (BRASIL, 2008).

2.3 O Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008

A infração ambiental fundamenta-se na transgressão das normativas estabelecidas para salvaguardar o meio ambiente, isto é, é necessário que haja uma ação que desrespeite as regulamentações ambientais para que seja caracterizada uma infração administrativa ambiental. A penalidade administrativa será aplicada, portanto, somente em situações em que a conduta atribuída ao agente esteja em conformidade com o enquadramento legal preciso, em observância ao princípio da estrita legalidade.

Cabe destacar que nem toda infração administrativa ambiental, neste trabalho referida apenas como infração ambiental, configura crime ambiental. O Quadro 1 mostra a

correspondência entre as infrações administrativas ambientais e seus correspondentes crimes.

Diante disso, a apuração administrativa das infrações ambientais deve seguir um procedimento administrativo específico. Nesse contexto, o Decreto Federal 6.514, de 22 de julho de 2008 visou regulamentar a Lei de Crimes Ambientais, dispondo sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente e estabelecendo o processo administrativo para apuração destas infrações.

Quadro 1 - Correspondência entre infrações ambientais previstas no Decreto 6.514/2008 e crimes ambientais previstos na Lei 9.605/1998

Decreto 6.514/2008		Lei 9.605/1998			Decreto 6.514/2008		Lei 9.605/1998		
Artigo	Parág.	Artigo	Parág.	Inciso	Artigo	Parág.	Artigo	Parág.	Inciso
24	-	29	-	-	59	-	42	-	-
25	-	31	-	-	61	-	54	-	-
26	-	30	-	-	62	-	54	2º	-
27	-	29	5º	-	63	-	55	-	-
29	-	32	-	-	64	-	56	-	-
34	-	33	Único	I	66	-	60	-	-
35	-	34	-	-	67	-	61	-	-
36	-	35	-	-	72	-	62	-	-
39	-	33	Único	II	73	-	63	-	-
43	-	38	-	-	74	-	64	-	-
44	-	39	-	-	75	-	65	-	-
45	-	44	-	-	77	-	69	-	-
47	-	46	-	-	78	-	69	-	-
48	-	48	-	-	82	-	69-A	-	-
49	-	50	-	-	84	-	40	-	-
49	Único	38-A	-	-	89	-	40	-	-
50	-	50	-	-	90	-	40	-	-
51	-	50-A	-	-	91	-	40	-	-
56	-	49	-	-	92	-	52	-	-
57	-	51	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

O referido decreto define infração administrativa ambiental como sendo toda ação ou omissão que viole as regras jurídicas de uso, gozo, promoção, proteção e recuperação do meio ambiente. Em sua estrutura, o decreto elenca as infrações de forma similar à LCA, porém, relacionando valores pecuniários a serem aplicados no procedimento de apuração das infrações ambientais.

Pela definição, nota-se que “a tutela administrativa ambiental não visa apenas à repressão dos efetivos prejuízos ao meio ambiente, mas também coibir condutas potencialmente danosas aos recursos ambientais ou que violem as normas ambientais em vigor.” (SILVA, 2015,

p. 601).

O Decreto Federal 6.514/2008 dispõe que as infrações administrativas ambientais são punidas com as seguintes sanções:

- Advertência: aplicada, mediante a lavratura de auto de infração, para as infrações administrativas de menor lesividade ao meio ambiente, assim consideradas quando a multa consolidada não ultrapasse o valor de R\$ 1.000,00 (mil reais) ou, na hipótese de multa por unidade de medida, não exceda o valor referido. Advertência pode ser conceituada como “a repreensão de alguém em face da ocorrência ou risco de ocorrência de um ato lesivo ao meio ambiente, com vistas a que seu autor tome providências para impedir o dano ou deixar de causá-lo” (GRANZIERA, 2009, p. 614);
- Multa simples: valor pecuniário que tem por base a unidade, hectare, metro cúbico, quilograma, metro de carvão-mdc, estéreo, metro quadrado, dúzia, estipe, cento, milheiros ou outra medida pertinente, de acordo com o objeto jurídico lesado;
- Multa diária: valor pecuniário aplicado sempre que o cometimento da infração se prolongar no tempo;
- Apreensão dos animais, produtos e subprodutos da fauna e flora e demais produtos e subprodutos objeto da infração, instrumentos, petrechos, equipamentos ou veículos de qualquer natureza utilizados na infração;
- Destruição ou inutilização do produto: será sempre aplicada quando a medida for necessária para evitar o seu uso e aproveitamento indevidos nas situações em que o transporte e a guarda forem inviáveis em face das circunstâncias; ou que os produtos possam expor o meio ambiente a riscos significativos ou comprometer a segurança da população e dos agentes públicos envolvidos na fiscalização;
- Suspensão de venda e fabricação do produto: trata-se de medida que visa a evitar a colocação no mercado de produtos e subprodutos oriundos de infração administrativa ao meio ambiente ou que tenha como objetivo interromper o uso contínuo de matéria-prima e subprodutos de origem ilegal;
- Embargo de obra ou atividade e suas respectivas áreas: aplicado nos locais onde efetivamente se caracterizou a infração ambiental, não alcançando as demais atividades realizadas em áreas não embargadas da propriedade ou posse ou ainda não correlacionadas com a infração;
- Demolição de obra: aplicada sempre que verificada a construção de obra em área ambientalmente protegida em desacordo com a legislação ambiental; ou quando a obra

ou construção realizada não atenda às condicionantes da legislação ambiental e não seja passível de regularização;

- Suspensão parcial ou total das atividades: constitui medida que visa impedir a continuidade de processos produtivos em desacordo com a legislação ambiental, como por exemplo, um empreendimento industrial que se utiliza de máquinas ou equipamentos obsoletos ou inadequados, total ou parcialmente, em desacordo com as condicionantes exigidas pela licença ambiental;
- Restritiva de direitos: aplicadas às pessoas físicas ou jurídicas, englobando (a) suspensão de registro, licença ou autorização; (b) cancelamento de registro, licença ou autorização; (c) perda ou restrição de incentivos e benefícios fiscais; (d) perda ou suspensão da participação em linhas de financiamento em estabelecimentos oficiais de crédito; e (e) proibição de contratar com a Administração Pública.

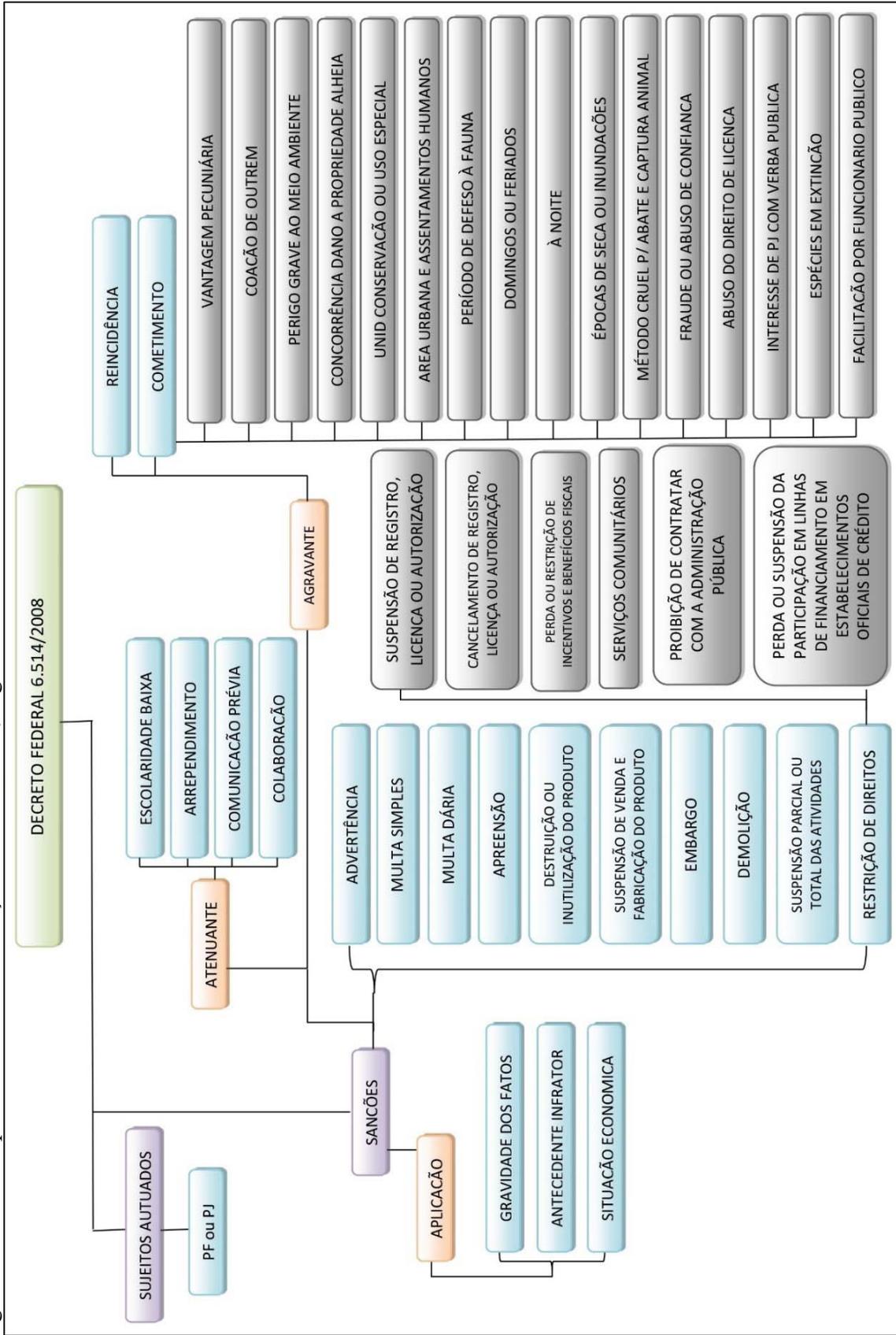
Cabe destacar que o agente autuante, ao lavrar o auto de infração, indicará as sanções a serem aplicadas observando os seguintes critérios:

- I) Gravidade dos fatos, tendo em vista os motivos da infração e suas consequências para a saúde pública e para o meio ambiente;
- II) Antecedentes do infrator, quanto ao cumprimento da legislação de interesse ambiental;
- III) Situação econômica do infrator (no caso de multa).

O primeiro componente a ser considerado, a gravidade dos fatos, relaciona-se com as repercussões na saúde pública e/ou no meio ambiente. A ocorrência de uma infração administrativa ambiental com o objetivo exclusivo de ampliar ganhos econômicos, gerando danos concretos ao ambiente ou à saúde humana, demanda uma graduação mais elevada da penalidade do que aquela em que se violou uma norma sem as consequências relacionadas. O componente relativo aos antecedentes do infrator, exige a apreciação não apenas das ações anteriores relacionadas ao descumprimento da legislação administrativa, mas também no tocante à possível desobediência da legislação penal e, como tal, à condenação correspondente, tanto para a pessoa física quanto para a pessoa jurídica. Por fim, a condição econômica constitui o elemento conclusivo para a determinação do montante da multa, conforme os critérios estabelecidos em cada modalidade administrativa (GOMES; MACIEL, 2015).

O fluxo da Figura 2 mostra uma visão geral do procedimento de autuação de infrações ambientais, elencando os sujeitos da atuação, as sanções aplicáveis juntamente com seus agravantes e atenuantes.

Figura 2 - Fluxo do procedimento de autuação administrativa, segundo o Decreto Federal 6.514/2008



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.4 Valoração econômica do dano ambiental

A noção de dano está diretamente relacionada à ocorrência de fatos que, por qualquer motivo, provoquem a alteração de bem destinado à satisfação de interesses ou necessidades juridicamente protegidos e tutelados.

O arcabouço legislativo ambiental brasileiro não carrega um conceito próprio acerca do dano ambiental. Entretanto, diversos autores e doutrinadores, em razão dessa lacuna trazida pela legislação nacional, trouxeram conceitos em relação ao assunto.

Antunes (2000) *apud* Milaré (2009, p. 837) coloca que “se o próprio conceito de meio ambiente é aberto, sujeito a ser preenchido casuisticamente, de acordo com cada realidade concreta que se apresente ao intérprete, o mesmo entrave ocorre quanto à formulação do conceito de dano ambiental”, sendo, na visão de Milaré (2009, p. 837), “essa, provavelmente, a razão de não ter a lei brasileira, ao contrário de outras, conceituado, às expressas, o dano ambiental”. O autor ainda destaca que “nada obstante, delimitaram-se as noções de degradação da qualidade ambiental e de poluição” quando da promulgação da Lei 6.938/1981, que traz suas definições em seu art. 3º, incisos I e III:

Art. 3º - Para os fins previstos nesta Lei, entende-se por: II - degradação da qualidade ambiental, a alteração adversa das características do meio ambiente; III - poluição, a degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente: a) prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população; b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas; c) afetem desfavoravelmente a biota; d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente; e) lancem matérias ou energia em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos. (BRASIL, 1981).

Considerando que o conceito de dano está relacionado ao prejuízo causado a alguém por um terceiro que se vê obrigado ao ressarcimento (ANTUNES, 2010), como uma lesão a um bem jurídico ou a interesse juridicamente protegido, e articulando-se as definições de degradação da qualidade ambiental e poluição, o dano ambiental, por conseguinte, é entendido como sendo os prejuízos patrimoniais ou extrapatrimoniais ocasionados a interesses que tenham por objeto o meio ambiente (CARVALHO, 2013).

Leite (1999, p. 98) afirma que “o dano ambiental, constitui uma expressão ambivalente, que designa, certas vezes, alterações nocivas ao meio ambiente e outras, ainda, os efeitos que tal alteração provoca na saúde das pessoas e em seus interesses”. Numa primeira acepção, configura-se como uma alteração indesejável ao conjunto de elementos que compõem o meio ambiente, noutra, engloba os efeitos que esta modificação gera na saúde das pessoas e em seus interesses.

O dano ao meio ambiente, por ser bem público, gera repercussão geral, impondo conscientização coletiva à sua reparação, a fim de resguardar o direito das futuras gerações a um meio ambiente ecologicamente equilibrado (AMADO, 2017).

Custódio (1983) apud Leite (1999, p. 94-95), abordando o tema, destaca que o dano, para fins de reparação decorrente de atividade poluente, tem como pressuposto básico a própria gravidade do acidente, seja causando prejuízo patrimonial ou não patrimonial a outrem, independente de tratar de risco permanente, periódico, ocasional ou relativo.

Antunes (2010), por sua vez, diz que não é difícil conceituar dano ambiental, já que ele nada mais é do que o dano ao meio ambiente, ou seja, dano ao bem jurídico meio ambiente.

Silva (2008) define dano ambiental como sendo qualquer lesão ao meio ambiente causado por ação de pessoa, seja ela física ou jurídica, de direito público ou privado e que pode resultar na degradação da qualidade ambiental, bem como na poluição, definida, nos termos da Política Nacional do Meio Ambiente, como a degradação da qualidade ambiental resultante de atividade humana.

Da análise empreendida da lei brasileira, conforme (LEITE, 1999, p. 108),

“o dano ambiental deve ser compreendido como toda lesão intolerável causada por qualquer ação humana (culposa ou não) ao meio ambiente, diretamente, como macrobem de interesse da coletividade, em uma concepção totalizante, e indiretamente, a terceiros, tendo em vista interesses próprios e individualizáveis e que refletem no macrobem”.

Diante do exposto, a valoração do dano ambiental torna-se uma tarefa difícil, pois o caráter sistêmico do meio ambiente “dificulta ver até onde e até quando se estendem as sequelas do estrago” (MILARÉ, 2009, p. 871).

Nesse contexto, a valoração econômica de danos ambientais relaciona-se com a atribuição de um valor monetário aos prejuízos causados ao meio ambiente. É utilizada para subsidiar decisões sobre políticas públicas e privadas que envolvem o meio ambiente, permitindo que os custos e benefícios de diferentes alternativas sejam comparados de forma mais clara e objetiva.

A importância da valoração ambiental reside em oferecer um valor de referência para quantificar monetariamente os danos ambientais, por meio de inúmeros métodos, cada um com suas peculiaridades, nem sempre atendendo a todos os tipos de danos ambientais (IBAMA, 2002; MPMS, 2018).

De acordo com Motta (1997) a valoração econômica de recursos ambientais determina quanto melhor ou pior estará o bem-estar das pessoas, em virtude de mudanças na qualidade e/ou na quantidade de bens e serviços ambientais, apropriados por meio do uso ou do

não uso.

A determinação do valor econômico de um recurso ambiental consiste em estimar o seu valor monetário em relação a outros bens e serviços disponíveis na economia. Independentemente do tipo de gestão a ser adotada por governos, organizações não governamentais, empresas ou famílias, o responsável pela gestão terá que lidar com o desafio de alocar um orçamento financeiro limitado diante de diversas opções de gastos que visam diferentes investimentos ou consumo (Motta, 1997).

A Valoração Econômica de Recursos Ambientais (VERA) é uma ferramenta que permite a tomada de decisões sobre a importância da conservação de ecossistemas, devido aos benefícios econômicos que esses ambientes oferecem para a sociedade. O valor total de um recurso natural pode ser classificado em valor de uso e valor de não-uso.

De acordo com Motta (1997), o valor de não-uso (ou valor passivo) representa o valor de existência (VE) que está dissociado do uso (embora represente consumo ambiental) e deriva-se de uma posição moral, cultural, ética ou altruística em relação aos direitos de existência de espécies não-humanas ou preservação de outras riquezas naturais, mesmo que estas não representem uso atual ou futuro para o indivíduo. Uma expressão simples deste valor é a grande atração da opinião pública para salvamento de baleias ou sua preservação em regiões remotas do planeta, onde a maioria das pessoas nunca visitarão ou terão qualquer benefício de uso.

O valor de uso, por sua vez, corresponde ao valor atribuído ao recurso natural pelo seu uso no presente ou seu uso potencial no futuro (PEIXOTO; SILVA; ALMEIDA, 2016), e subdivide-se em:

Valor de Uso Direto (VUD): quando o indivíduo se utiliza atualmente de um recurso, por exemplo, na forma de extração, visitação ou outra atividade de produção ou consumo direto;

Valor de Uso Indireto (VUI): quando o benefício atual do recurso se deriva das funções ecossistêmicas, como, por exemplo, a proteção do solo e a estabilidade climática decorrente da preservação das florestas;

Valor de Opção (VO): quando o indivíduo atribui valor em usos direto e indireto que poderão ser optados em futuro próximo e cuja preservação pode ser ameaçada. Por exemplo, o benefício advindo de fármacos desenvolvidos com base em propriedades medicinais ainda não descobertas de plantas em florestas tropicais.

Nesse contexto, o VERA pode ser representado por meio da expressão $VERA =$

$(VUD + VUI + VO) + VE$ e detalhado no Quadro 2 por meio da taxonomia geral do valor econômico do recurso ambiental (MOTTA, 1997).

Quadro 2 - Taxonomia geral do valor econômico do recurso ambiental

Valor Econômico do Recurso Ambiental			
Valor de Uso			Valor de Não-Uso
Valor de Uso Direto (VUD)	Valor de Uso Indireto (VUI)	Valor de Opção (VO)	Valor de Existência (VE)
Bens e serviços ambientais apropriados diretamente da exploração do recurso e consumidos hoje.	Bens e serviços ambientais que são gerados de funções ecossistêmicas e apropriados e consumidos indiretamente hoje.	Bens e serviços ambientais de usos diretos e indiretos a serem apropriados e consumidos no futuro.	Valor não associado ao uso atual ou futuro e que reflete questões morais, culturais, éticas ou altruísticas.

Fonte: Motta (1997).

A valoração econômica de recursos ambientais é importante em razão de os recursos ambientais serem frequentemente usados como insumos na produção de bens e serviços e, portanto, dotados valor econômico para a sociedade. Além disso, a atribuição de um valor monetário ao recurso ambiental pode ajudar a informar as decisões políticas sobre como gerenciar e proteger o ambiente natural.

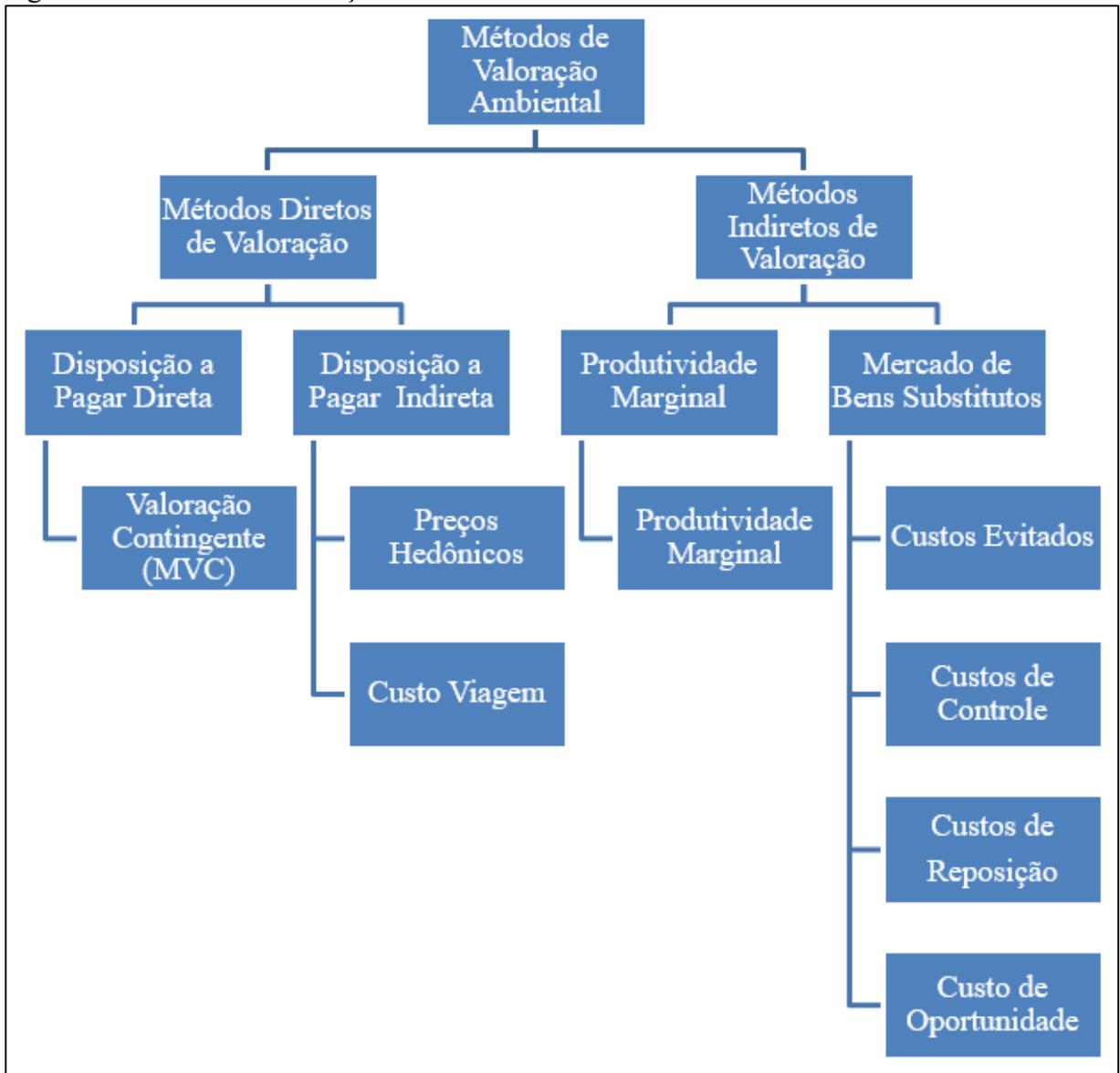
No entanto, a valoração econômica também é frequentemente criticada por reduzir os recursos ambientais a meras *commodities* e não considerar adequadamente sua importância intrínseca ou os valores não monetários associados a eles. Além disso, os métodos de valoração econômica têm limitações e incertezas inerentes, e os resultados podem ser influenciados por fatores como o contexto social, cultural e econômico em que as avaliações são realizadas.

A literatura científica apresenta várias metodologias eficientes de valoração que permitem estimar o preço de um recurso ambiental, seja por meio de uma função de produção ou através da formulação de um mercado hipotético para medir a disposição da população em pagar pelo recurso ambiental (BRANDLI *et al.*, 2006). Esses métodos estão agrupados em duas categorias principais, conforme Motta (1997): os métodos em função da produção e métodos em função da demanda.

Os métodos de valoração da função de produção são técnicas amplamente utilizadas para mensurar os valores econômicos de benefícios ou custos ambientais em relação a mudanças na disponibilidade de seus recursos, e são considerados menos complexos devido ao uso dos valores dos recursos privados disponíveis no mercado como parâmetros que não se alteram diante de variações. Por outro lado, os métodos de valoração da função de demanda reconhecem que a alteração na acessibilidade dos recursos ambientais modifica a disposição de cada indivíduo em pagar pelo bem ou serviço ambiental. (MOTTA, 1997). Cada método é

adequado para diferentes tipos de recursos ambientais e contextos. A partir dos trabalhos de Motta (1997), Ortiz, Motta e Ferraz (2000), Negri Neto (2003), Leite e Almeida (2005), Andrade (2008), Harris e Roach (2017) e Cavalcante, Piacenti e Oliveira (2022), resumiram-se os principais métodos de valoração ambiental na Figura 3.

Figura 3 - Métodos de valoração ambiental



Fonte: elaborado a partir de Motta (1997), Ortiz, Motta e Ferraz (2000), Negri Neto (2003), Leite e Almeida (2005), Andrade (2008), Harris & Roach (2017) e Cavalcante, Piacenti e Oliveira (2022).

No contexto da aplicação das multas ambientais, apesar da aplicabilidade teórica desses métodos, na prática, o cálculo de multas deve seguir os critérios específicos estabelecidos na legislação, quais sejam a gravidade dos fatos, os antecedentes do infrator e a sua situação econômica, que podem não se alinhar diretamente com os métodos de valoração

ambiental, demandando métodos específicos ou critérios pré-definidos que devem ser observados pelos órgãos ambientais ao aplicar as multas. A proposta formulada no presente trabalho visa fornecer uma alternativa metodológica que permita sistematizar o procedimento de estimativa do valor da multa se adequando aos critérios exigidos na legislação aplicável.

2.5 Modelos de representação e análise espacial por meio de Sistemas de Informação Geográfica

De acordo com Bertalanffy (1977, p. 63) um sistema é um “conjunto de elementos em interação”. Stair e Reynolds (2015) definem sistema como um conjunto de elementos que interagem para realizar objetivos, com entradas, mecanismos de processamento, saídas e realimentação, representando fatos do mundo real.

Um sistema configura um arranjo de entidades ou elementos relacionados ou conectados de maneira a constituir uma unidade ou um todo organizado, possuindo características próprias e submetidas a processos de transformação conhecidos. As entidades ou elementos são os objetos tomados como unidades básicas para a coleta dos dados que se relacionam com os atributos que caracterizam e atribuem sentido à unidade estudada (BRITO; ROSA, 1994).

No contexto ambiental, “um sistema representa entidades organizadas na superfície terrestre, de modo que a espacialidade se torna uma das suas características inerentes.” (CHRISTOFOLETTI, 1999, p. 35).

Para exemplificar um sistema, pode-se tomar um determinado lugar como entidade, cujas características, como temperatura, uso e cobertura e geomorfologia são seus atributos. Os dados disponíveis sobre os atributos da área estudada, que é o conjunto dessas entidades, representam as informações dessa área.

Um dado, por sua vez, não possui significado próprio, sendo um símbolo para a representação de fatos, conceitos ou instruções em forma convencional ou pré-estabelecida e apropriada para comunicação, interpretação e processamento (BRITO; ROSA, 1994), consistindo em números, textos ou símbolos que, de certa forma, são neutros e quase independentes de contexto (LONGLEY *et al.*, 2005).

O dado nada mais é do que um simples registro bruto, que isoladamente não permite uma tomada de decisão, sendo necessário o seu agrupamento e processamento para então produzir um conteúdo compreensível que permita uma tomada de decisão (MIRANDA, 1999).

Diante disso, verifica-se que quaisquer registros podem ser considerados dados,

como uma imagem, um par de coordenadas, um atributo temático de solo etc., necessitando que seja contextualizado de forma inteligível, reunidos num banco de dados, possibilitando a geração de informação a partir dele.

Nesse sentido, a informação contém em si uma série de dados interpretados, que receberam significação, servindo de base para a sua construção e, por consequência, permitindo a tomada de decisão ou desenvolvimento de algo (RIBEIRO; SANTOS, 2020). “É uma coleção de fatos organizados e processados de modo que tenham valor adicional, que se estende além do valor dos fatos individuais” (STAIR; REYNOLDS, 2015, p. 5).

No contexto geográfico, a informação geográfica é entendida como o conhecimento dos fenômenos geográficos, com uma descrição tão fiel e completa quanto possível, compreendendo informações descritoras de objetos, fenômenos, seres vivos ou sociedades desde que sejam ligadas a um território (DENÈGRE, 2005). É, portanto, o resultado de dados e sua interpretação e, em muitos casos, extrai deles todas as informações que eles possam conter (OLAYA, 2018).

O processo de definir relações entre os dados para criar informações úteis requer conhecimentos, que consistem, segundo Stair e Reynolds (2015, p. 6), na “consciência e compreensão de um conjunto de informações e maneiras como essas informações podem ser úteis para apoiar uma tarefa específica ou para chegar a uma decisão.”

Em razão da importância da informação espacial, ferramentas para auxiliar na gestão e gerenciamento do conhecimento geográfico foram desenvolvidas. Essas ferramentas são denominadas Sistemas de Informação Geográficas (SIG).

Produtos de informação geográfica são resultados de informação, concebidos pelo usuário, criados através de um Sistema de Informações Geográfica – SIG e da habilidade do usuário em relacionar, manipular e apresentar dados geográficos sobrepostos, por meio do conhecimento aplicado. Esses produtos são usados para analisar dados para uma aplicação específica (GALATI, 2006).

Diante do exposto, um Sistema de Informações Geográfica – SIG é conceituado como uma ferramenta computacional para entrada, manipulação, armazenamento e saída de dados espaciais digitais, além de permitir a aquisição, gestão, análise e visualização de dados espaciais viabilizando o planejamento, administração e monitoramento ambiental, representando um modelo digital da geografia, em sentido amplo (DEMERS, 2009; KENNEDY, 2013; KONECNY, 2014; BOLSTAD, 2016; CHANG, 2018).

Um SIG inclui os dados, que são gerenciados por uma administração ou uma

unidade que conduz um projeto para fins de inventário, análise e apresentação de dados para suporte administrativo ou suporte à decisão (KONECNY, 2014).

Olaya (2018) define SIG como uma ferramenta para trabalhar com informação georreferenciada, permitindo efetuar operações de leitura, edição, armazenamento, gestão e análise de dados, o que inclui desde consultas simples até modelos complexos, que podem ser realizados por meio do componente espacial (localização de cada valor ou elemento), componente temático (o valor do elemento ou o elemento em si), ou ambos. Além disso, permite a geração de documentos, como mapas, relatórios, impressões, dentre outros.

O Dicionário de Terminologia SIG do *Environmental Systems Research Institute* ESRI (2001) conceitua SIG como uma coleção de *hardware* de computador, *software* e dados geográficos para capturar, armazenar, atualizar, manipular, analisar e exibir todas as formas de dados geográficos. informações referenciadas. O SIG é, em essência, um repositório central e uma ferramenta analítica para dados geográficos coletados de várias fontes. O desenvolvedor pode sobrepor as informações dessas diversas fontes por meio de temas e camadas, realizar uma análise abrangente dos dados e retratá-los graficamente para o usuário.

Para İncekara (2012), os Sistemas de Informação Geográfica (GIS) podem ser definidos como um sistema de mapeamento abrangente projetado para capturar, armazenar, analisar, sintetizar, consultar, editar, recuperar, manipular e exibir dados espaciais obtidos da superfície terrestre na forma de gráficos, Tabelas, imagens 3D e mapas com base na riqueza das informações inseridas no banco de dados GIS.

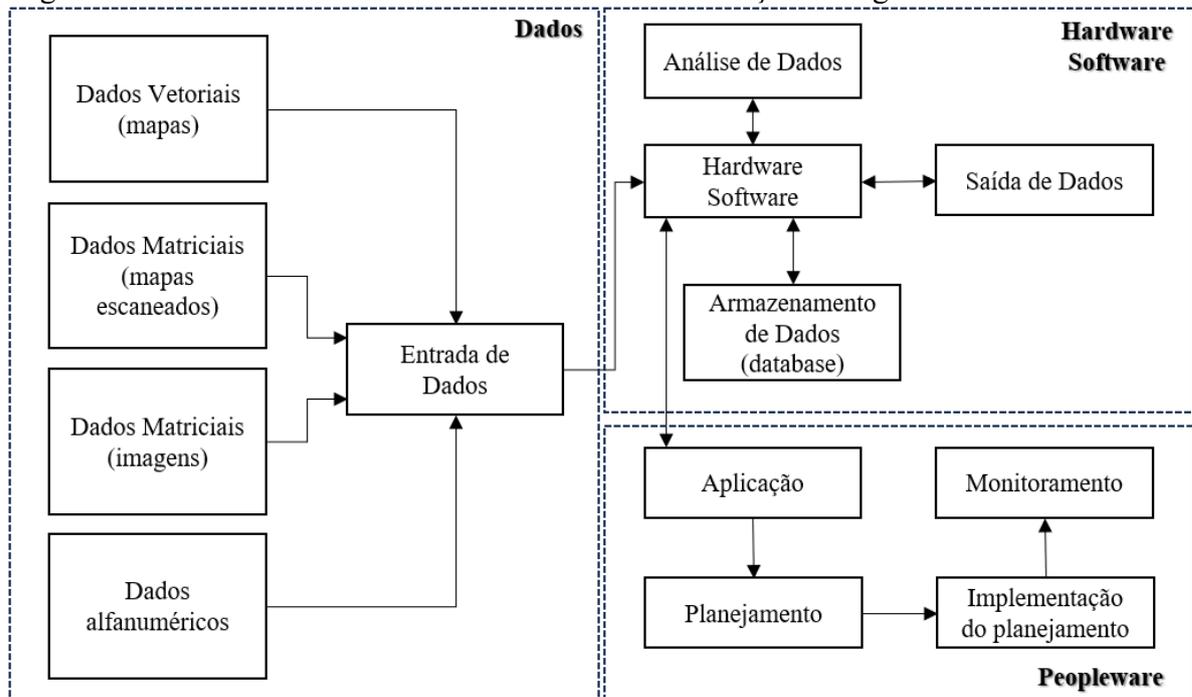
O desenvolvimento dos sistemas de informações geográficas (SIG) em ambientes computacionais é relativamente recente, tendo pouco mais de quatro décadas de existência. Em razão das preocupações ambientais, nesta área os SIG obtiveram um grande avanço tanto no aspecto teórico, como tecnológico e organizacional. Atualmente, ainda é bastante crescente o uso do SIG e isso está associado ao crescimento maciço do interesse do manejo da informação geográfica por métodos computacionais (MENEZES; FERNANDES, 2013).

Os procedimentos operacionais para a modelagem de sistemas ambientais ganharam realce com as tecnologias envolvidas nos sistemas de informação geográfica (CHRISTOFOLETTI, 1999). Os SIG, como instrumentos computacionais do geoprocessamento, nos permitem realizar diversas análises complexas, integrando dados de fontes diferentes e criando bancos de dados georreferenciados, tornando possível a automatização do processo de produção de documentos cartográficos.

A Figura 4 apresenta a estrutura conceitual de um SIG, que possui três importantes

componentes fazem parte da sua estrutura: *hardware/software* (equipamento e programas), *peopleware* (adequado contexto organizacional, incluindo pessoas qualificadas) e *dados geográficos* (BURROUGH; MCDONNELL, 1998; ESRI, 2001; YANG, 2017; CHANG, 2018).

Figura 4 - Estrutura conceitual de um Sistema de Informações Geográficas – SIG



Fonte: Adaptado de Huang Bo (2018).

O papel dos SIG no órgãos de controle e fiscalização ambiental é crucial na tomada de decisão sobre a viabilidade ambiental de um empreendimento, monitoramento do comportamento espacial das atividades impactantes, bem como na demarcação de áreas objeto de sanções ambientais, o que evidencia a clara necessidade do uso de modelos espaciais baseados em SIG para tomada de decisão na garantia do meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem como na responsabilização daqueles que agem contrariamente a esse princípio, sempre baseado em dados e informações geográficas.

Diante disso, os elementos e fenômenos físico-naturais e socioeconômicos são convertidos em modelos matemáticos e computacionais para representar a realidade por meio de ferramentas e técnicas típicas do geoprocessamento e processados por meio de uso de SIG (MORAIS, 2018).

Essa representação da realidade por meio da modelagem do ambiente perpassa pela visão do ambiente como um sistema, definido por Silva (2007) como uma entidade com dimensão espacial, modelada segundo a sua variabilidade taxonômica e distribuição territorial

das classes de fenômenos nela identificadas como relevantes, sendo considerada a dinâmica desses sistemas ambientais, que deve ser abordada por meio de uma sequência de etapas selecionadas para representar a transformação do ambiente em um período específico.

Essa tradução do mundo real para o computacional exige um arcabouço conceitual que permite o entendimento das representações computacionais do espaço, abordado por Câmara e Monteiro (2001) como o “paradigma dos quatro universos”, que distingue os universos do mundo real, conceitual (matemático), de representação e de implementação.

No *universo do mundo real* encontram-se os fenômenos a serem representados, compreendendo as entidades a serem modeladas computacionalmente, tais como a litologia, o tipo de solo, dados topográficos, classes de uso e cobertura da terra. A representação do mundo real é realizada por meio da associação de uma escala de medida e referência a cada tipo de informação geográfica.

No mundo real, a informação geográfica tem dois componentes distintos: espacial e temático. O componente espacial responde à pergunta "onde". O componente temático responde à pergunta "o quê". O componente espacial está relacionado à localização geográfica, ou seja, a descrição da realidade em termos de sua posição geográfica em relação a um sistema de referência de coordenadas previamente conhecido. O componente temático, por sua vez, relaciona-se aos atributos do objeto ou fenômeno representado, evidenciando suas características (OLAYA, 2018), como por exemplo, a declividade, tipos de solo, densidade demográfica, temperatura da superfície etc. Ambos os componentes espacial e temático são essenciais para análise e interpretação da informação geográfica.

Enquanto o componente espacial normalmente é representado por valores numéricos, considerando que a maioria dos sistemas de coordenadas geográficas são numéricos, o componente temático dos atributos pode ser numérico (qualitativo ou quantitativo) ou alfanumérico (qualitativo). Uma variável numérica classifica-se em quatro diferentes formas: nominal, ordinal, intervalar e de razão (FISCHER; SCHOLTEN; UNWIN, 1996; DENT; TORGUSSON; HODLER, 2009; MENEZES; FERNANDES, 2013; BOLSTAD, 2016; OLAYA, 2018; OYANA, 2021). As variáveis nominais e ordinais são qualitativas e as variáveis na forma de intervalos e razão são quantitativas (DE BY; HOUISMAN, 2001).

Nesse contexto, os atributos nominais são variáveis que fornecem informações descritivas sobre um objeto, sendo o nível mais simples de medição de dados, usados para estabelecer identidade (HEYWOOD; CORNELIUS; CARVER, 2006; DENT; TORGUSSON; HODLER, 2009; OLAYA, 2018).

Os atributos nominais servem como um identificador para nomear ou classificar uma determinada variável, como classes de uso e cobertura ou tipos de solo, sendo incompatíveis com operações matemáticas entre dados.

Atributos ordinais implicam um ranking ou ordem por seus valores (HEYWOOD; CORNELIUS; CARVER, 2006; BOLSTAD, 2018; CHANG, 2018). A estrutura resultante da representação ordinal é uma hierarquia de posição ou ordem entre os atributos dos dados. Nesse formato de representação, os atributos são organizados do menor para o maior ou vice-versa, e a informação obtida é do tipo “maior que” ou “menor que”, não havendo determinação da dimensão dessa diferença que separa os itens na sequência (DENT; TORGUSSON; HODLER, 2009).

Os atributos ordinais podem ser descritivos, tais como numa classificação de gravidade de um determinado evento no ambiente (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta) ou pode ser numérica seguindo uma ordenação hierárquica, como um intervalo de 1 a 5, sendo 1 a classe de gravidade muito baixa e 5 a classe de gravidade muito alta.

Os atributos intervalares possuem distância conhecida entre os valores, com incrementos detalhados passíveis de medição (DE MERS, 2009; CHANG, 2018), ou seja, serão intervalares aqueles atributos que “as diferenças entre os valores façam sentido” (LONGLEY *et al.*, 2005, p. 69).

Por ser uma escala quantitativa, o atributo de intervalo fornece uma medição mais precisa de observações individuais do que as escalas nominais ou ordinais, possuindo também as propriedades de identidade, magnitude e intervalos iguais (BOLSTAD, 2016; OYANA, 2021).

É importante destacar que, apesar de os atributos na forma intervalar permitirem medições muito precisas, não é possível medi-los na forma de razão, ou seja, nesta escala, um dado A de valor 10 e outro B de valor 5, não representa uma relação do tipo A é o dobro de B, mas tão somente que “B é menor do que A” ou “A é maior do que B”. Por exemplo, se a temperatura da superfície do solo de uma cidade A está a 30 °C e numa cidade B está a 15 °C, apenas será possível afirmar que a superfície do solo da cidade A está 15 °C mais quente que a da cidade B, mas não será possível afirmar que A é duas vezes mais quente do que B porque 0 °C é um ponto de partida arbitrário e não absoluto, e os valores de temperatura podem, portanto, ser negativos.

A escala de razão possui todas as características das escalas nominais, ordinais e de intervalo, além da vantagem de zero ter um significado preciso quando é atribuído a uma

observação, de forma que o valor de sua origem ou posição zero indica a ausência da quantidade sendo medida para um determinado objeto, possuindo propriedades de identidade, magnitude, intervalos iguais e zero absoluto, um ponto de partida conhecido (DENT; TORGUSSON; HODLER, 2009; CHANG, 2018; OYANA, 2021). Os atributos classificados nesse formato de representação possuem unidades mensuráveis, como dados de intervalo, mas também permitem comparações de razão que os dados de intervalo não permitem e a diferença entre os números possui significado real (HEYWOOD; CORNELIUS; CARVER, 2006; DE MERS, 2009).

Diferentemente do que foi exposto para os atributos intervalares, os de razão permitem uma noção de proporcionalidade direta entre as medidas. Se um determinado ponto A da superfície está localizado a 100 metros de um recurso hídrico e outro B, a 200 metros, pode-se dizer que o ponto B está duas vezes mais distante que o ponto A em relação ao recurso hídrico.

Em resumo, o universo do mundo real está relacionado às escalas de mensuração que nos permitem associar escalas de medição ou grandezas numéricas aos objetos computacionalmente representados.

No âmbito do *universo conceitual*, o espaço geográfico é modelado por meio de conceitos de *geocampos* e *geo-objetos* (WORBOYS, 1995; CAMARA; MONTEIRO, 2001). O modelo de geocampos enxerga o espaço geográfico como uma superfície contínua, sobre a qual variam os fenômenos a serem observados segundo diferentes distribuições. O modelo de geo-objetos representa o espaço geográfico como uma coleção de entidades distintas e identificáveis, sendo um elemento único que possui atributos não-espaciais e está associado a múltiplas localizações geográficas (GOODCHILD, 1992; TOMLIN, 1994; WORBOYS, 1995; CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

Esse nível fornece um conjunto de conceitos formais com os quais entidades geográficas podem ser modeladas conforme percebido pelo usuário, em um alto nível de abstração. As classes básicas a serem criadas no banco de dados, contínuas ou discretas, são definidas neste nível. Essas classes estão associadas a classes de representação espacial que variam de acordo com o grau de percepção do usuário, ou seja, o usuário definirá como será representada a entidade geográfica (BORGES; DAVIS; LAENDER, 2001)

Câmara e Monteiro (2001) classificam os geocampos em temáticos (mapa de tipo de solo, classe de uso e cobertura), numéricos (mapa hipsométrico) ou dado de sensor remoto (imagem de sensor passivo ou ativo). Os geo-objetos normalmente são representados por pontos, linhas ou polígonos.

No *universo de representação* são definidas as representações espaciais das entidades definidas no universo conceitual, a forma como será representada e percebida pelo usuário (CÂMARA; MONTEIRO, 2001).

Nesse sentido, em relação às formas como um dado geográfico pode ser medido, as operações e abordagens de representação e armazenamento que podem ser realizadas dependem do tipo de variável contida no seu componente temático, pois os sistemas computacionais exigem instruções não ambíguas sobre como transformar dados que representam entidades espaciais em representações gráficas. Esse processo está relacionado ao design e implementação dos modelos de dados. Atualmente, existem duas principais maneiras pelas quais os computadores podem manipular e exibir os dados espaciais: as abordagens ou modelos de dados vetorial e *raster* ou matricial (HEYWOOD; CORNELIUS; CARVER, 2006; CHANG, 2018; OYANA, 2021).

Os dados matriciais e vetoriais possuem uma ampla possibilidade de uso que variam em complexidade do uso, aparência, formato e tamanho do arquivo. Embora sejam estruturalmente diferentes, compartilham duas características: representam visualmente características do mundo real e estão sujeitos à orientação dentro do mundo real. Ao satisfazer ambas essas características, os dados geográficos são criados e tornam-se interoperáveis com outras fontes de dados geográficos dentro do SIG (GALATI, 2006).

As estruturas de dados *raster* caracterizam dados contínuos (como imagens), consistindo em uma grade 2D regular de células quadradas. A grade é caracterizada por uma origem, sua orientação, ambas geocodificadas e o tamanho da célula raster, que para imagens corresponde a um tamanho de pixel (elemento de imagem). Sabendo a orientação da grade, o tamanho das células (pixel) e pelo menos as coordenadas de uma delas, é possível conhecer a localização de todas as células, graças à sua estrutura regular. O tamanho da célula é um parâmetro relacionado à escala da camada, uma vez que define sua resolução e depende do nível de detalhe utilizado quando as medidas correspondentes foram tomadas (LONGLEY *et al.*, 2005; GALATI, 2006; OLAYA, 2018).

O modelo de dados vetorial, também denominado modelo de objeto discreto, usa objetos discretos para representar as feições na superfície terrestre. Pode ser representado de três formas básicas: pontos, linhas e polígonos. Esta estrutura de dados é construída com base em coordenadas bidimensionais (x, y) e tridimensionais ordenadas (x, y, z). As características são representadas como formas geométricas definidas através de coordenadas únicas ou agrupadas em uma grade definida (GALATI, 2006; DEMERS, 2009; CHANG, 2018).

O componente temático no modelo vetorial é definido usando atributos. Uma camada vetorial geralmente contém múltiplos atributos, que são associados a características que podem ter informações de todos os tipos e são mais versáteis que os valores associados a camadas *raster*, que normalmente contém apenas valores numéricos (OLAYA, 2018).

No *universo de implementação* são definidos padrões, mecanismos de armazenamento, estruturas de dados e funções padrão para implementar cada representação. São concretizados os conceitos e representações, bem como indicadas quais as estruturas de dados a serem utilizadas para construir um sistema de geoprocessamento.

A partir dos conceitos expostos referentes aos diferentes universos ou níveis do modelo espacial, será possível construir um base de dados e informações geográficas a serem organizadas num ambiente de trabalho num Sistema de Informações Geográficas, permitindo-se a análise e tomada de decisões.

2.6 Análise multicritério espacial

A integração entre Análise Multicritério e Análise Espacial tem se tornado um método crescentemente popular no desenvolvimento de modelos espaciais em diversas áreas do conhecimento.

A Análise Multicritério Espacial (AMCE) é uma ferramenta poderosa que combina dados espaciais e técnicas de tomada de decisão para apoiar processos decisórios complexos em diversos campos, como planejamento urbano, gestão ambiental e desenvolvimento de infraestrutura, permitindo a integração de múltiplos critérios ou fatores, como dados sociais, econômicos, ambientais e espaciais, para avaliar diferentes alternativas e determinar a melhor solução ou decisão possível com base em um conjunto de objetivos predefinidos.

Problemas de decisão espacial geralmente envolvem um vasto conjunto de alternativas viáveis e múltiplos critérios de avaliação que são conflitantes e incomensuráveis. As alternativas são frequentemente avaliadas por um número de indivíduos (tomadores de decisão, gestores, partes interessadas, grupos de interesse) e esses indivíduos são tipicamente caracterizados por preferências únicas em relação à importância relativa dos critérios com base nos quais as alternativas são avaliadas (MALCZEWSKI, 2006).

Os problemas que envolvem tomada de decisão possuem como característica principal a complexidade. No campo das geotecnologias, quando se trata de questões atinentes ao espaço geográfico, é comum nos depararmos com inúmeros fatores ou alternativas a serem

considerados. A avaliação dessas alternativas se baseia em múltiplos critérios que frequentemente são contraditórios entre si, como por exemplo, questões econômicas frente a questões ambientais, dificultando a compatibilização desses critérios, tornando a análise multicritério espacial ainda mais desafiadora.

A Análise Multicritério Espacial (AMCE) é fundamentalmente um método que converte e sintetiza informações geográficas (mapas de entrada) com as preferências de tomadores de decisão (especialistas) para gerar mapas orientados à decisão (mapas de saída). Este processo requer a manipulação de dados geográficos, a incorporação das inclinações de decisores ou especialistas e a fusão destes elementos conforme diretrizes de decisão específicas. Um ponto crucial da AMCE é sua capacidade de avaliar opções de decisão geograficamente determinadas, fundamentadas em critérios específicos (ou atributos) e nas inclinações dos tomadores de decisão. Isso sugere que os desfechos das análises da AMCE são influenciados não apenas por representações espaciais das opções, mas também pelos critérios de avaliação adotados nas etapas decisórias (MALCZEWSKI, 1999; DROBNE; LISEC, 2009; GREENE *et al.*, 2011; MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

Silva *et al.* (2008) destaca uma questão primordial vinculada aos processos decisórios que englobam múltiplos critérios: a determinação da relevância relativa de cada critério no problema avaliado, abordando os desafios ao se quantificar essa relevância, dado que a importância dos critérios pode oscilar conforme o julgamento de diferentes agentes decisórios. Assim, torna-se imperativo estabelecer a significância relativa destes critérios, processo este que comumente é executado por meio da atribuição de pesos específicos. A acurada determinação desses pesos é de suma importância para que as preferências dos agentes decisórios sejam efetivamente representadas.

Como regra, os problemas de decisão espacial envolvem tomadores de decisão, critérios e alternativas, bem como procedimentos de ponderação e normalização de critérios com base em regras de decisão (EASTMAN *et al.* 1993; MELLO *et al.*, 2003; GREENE *et al.*, 2011; ZARGHAMI; SZIDAROVSKY, 2011; MALCZEWSKI; RINNER, 2015; ŠUŠNJAR *et al.*, 2022).

O tomador de decisão pode ser entendido como aquele que, com base nas demandas dos interessados, será o responsável pelo processo decisório, entregando os resultados e formulando as recomendações para a tomada de decisão, podendo ser um indivíduo, um grupo de pessoas ou uma organização (GOMES; GOMES; ALMEIDA, 2002; MALCZEWSKI; RINNER, 2015; MUNIER; HONTORIA; JIMÉNEZ-SÁEZ, 2019).

As decisões ou inclinações de um indivíduo durante um processo são influenciadas por fatores dinâmicos, tais como a trajetória de vida, expertise profissional, seu acervo de conhecimento e capacidade criativa. Estes fatores estão sujeitos a mudanças, conforme novos conceitos e informações são assimilados e outros são descartados, conferindo uma dinâmica intrínseca ao processo decisório (TCHEMRA, 2009).

Seja um indivíduo, grupo ou organização, o tomador de decisão é fundamental no processo de tomada de decisão, responsável por avaliar as demandas das partes interessadas e formular decisões consequentes. Podem ser denominados por vários termos, como “agente de decisão” ou “especialista”, sendo que seus julgamentos e valores influenciam significativamente os resultados, colocando seus pontos de vista através de critérios.

Crítérios compreendem uma condição que se pode quantificar ou avaliar (RAMOS, 2000; ALINEZHAD; KHALILI, 2019). São padrões de julgamento ou regras determinadas de acordo com a natureza e característica das alternativas selecionadas, permitindo a sua avaliação, comparação e ordenação, podendo variar a depender do objetivo (MUNIER; HONTORIA; JIMÉNEZ-SÁEZ, 2019).

No âmbito da tomada de decisão espacial, os critérios podem ser categorizados como espacialmente explícitos ou espacialmente implícitos. Os critérios explícitos referem-se diretamente aos atributos espaciais inerentes às alternativas de decisão. Um critério é classificado como espacialmente implícito quando a assimilação de dados espaciais é imperativa para determinar seu nível de realização. Embora influenciados por fatores espaciais, não descrevem diretamente características espaciais, necessitando de dados espaciais para sua computação ou avaliação, mas os critérios em si são mais abstratos ou derivados de considerações espaciais (MALCZEWSKI, 2006; CHAKHAR; MOUSSEAU, 2008).

A título de exemplo, podem ser citados como explícitos critérios como Declividade, Uso e Cobertura da Terra e Distância de Recursos Hídricos. Como critérios implícitos, podem ser citados o Impacto Ambiental de Projetos, Viabilidade de Projetos de Conservação e Custo de Restauração Ecológica. Dessa forma, nota-se claramente que critérios explícitos fornecem uma avaliação espacial direta, enquanto critérios implícitos oferecem uma avaliação derivada e influenciada por considerações espaciais. O trabalho desenvolvido nesta tese utilizará apenas critérios espacialmente explícitos.

Ainda no contexto dos critérios, considerando a literatura relacionada aos sistemas de informação geográfica, um critério é um termo genérico que inclui os conceitos de objetivo e atributo (MALCZEWSKI, 1999; MALCZEWSKI; RINNER, 2015; ALINEZHAD;

KHALILI, 2019). O objetivo está relacionado ao estado desejado de um determinado sistema na realidade, como por exemplo, a discriminação de áreas onde uma conduta lesiva ao meio ambiente seja mais ou menos grave. O objetivo indica as direções de melhoria de um ou mais atributos, ou seja, “quanto mais do atributo, melhor” ou “quanto menos do atributo, melhor”.

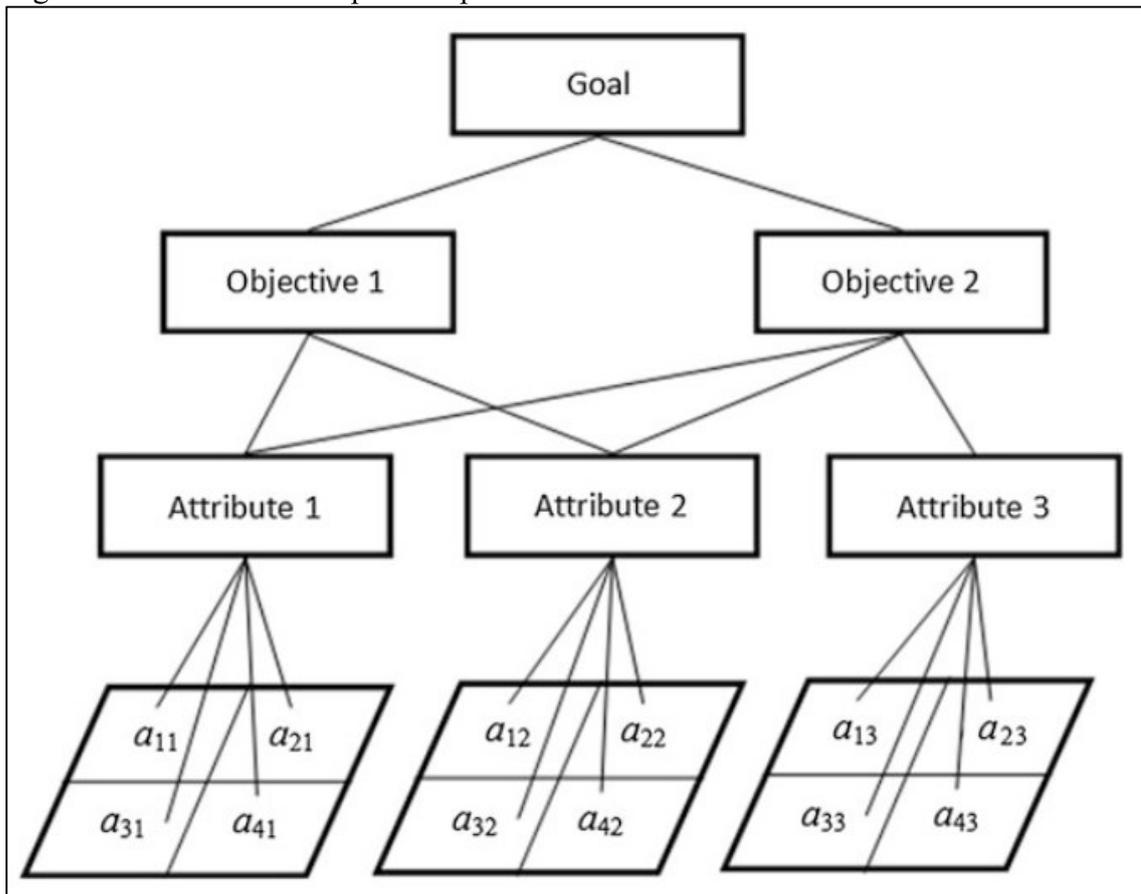
O atributo, por sua vez, mede o desempenho de uma alternativa em relação a um objetivo. Utilizando o exemplo da gravidade da conduta lesiva, o atributo possível poderia ser a declividade, classes de solo, distância de estradas, recursos hídricos ou qualquer outra medida de proximidade.

As relações entre objetivos e atributos possuem uma estrutura hierárquica. Os objetivos mais gerais estão no nível mais alto. Esses objetivos gerais podem ser definidos em termos de objetivos mais específicos, que são definidos em níveis mais baixos. No nível mais baixo da hierarquia estão os atributos, que são indicadores quantificáveis do grau em que os objetivos associados são atingidos (SAATY, 1980).

A Figura 5 mostra a estrutura hierárquica do problema de decisão, onde a_{ik} é o valor do k -ésimo atributo (critério) associado à i -ésima alternativa ($k = 1, 2, 3$ e $i = 1, 2, 3, 4$). Observe-se que a hierarquia desce do geral para o mais específico até que um nível de atributos seja alcançado. Este é o nível no qual as alternativas de decisão do nível mais baixo da hierarquia são avaliadas, estando cada nível ligado ao nível imediatamente superior.

As alternativas relacionadas à decisão são definidas como cursos alternativos de ação entre os quais o tomador de decisão deve escolher. No contexto geográfico, alternativa de decisão consiste em pelo menos dois elementos: ação (o que fazer?) e localização (onde fazer?) (MALCZEWSKI, 2011;2015).

Figura 5 - Estrutura hierárquica do problema de decisão



Fonte: Malczewski e Rinner (2015).

Uma alternativa é caracterizada ao se definir os valores das variáveis de decisão, que deve ser mensurável e podem ser classificadas em três categorias: binária, discreta e contínua. Uma decisão mais simples envolve executar ou não uma ação, podendo ser representado por uma variável binária, representada por 0 ou 1, sendo zero relacionado a não executar e um, executar. As variáveis binárias são um caso especial de variáveis discretas, que podem assumir qualquer valor finito e inteiro (MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Como exemplo de variáveis discretas podem ser citadas a quantidade de áreas embargadas, empreendimentos licenciados ou multados.

Uma variável contínua possui um número infinito de possíveis valores, todos dentro de um intervalo especificado (MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Um exemplo desta categoria de variável é pluviosidade de uma região ou a distribuição da declividade em um dado território.

Outra característica importante no contexto das alternativas é a sua viabilidade diante de restrições. As restrições consistem em limitações impostas às alternativas (variáveis de decisão), dicotomizando-as em duas categorias: as alternativas aceitáveis ou viáveis, e as

inaceitáveis ou inviáveis.

Em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), as restrições servem para excluir objetos geográficos a partir de condições específicas, sendo uma alternativa considerada viável apenas se estiver em conformidade com todas as restrições estabelecidas, caso contrário, é considerada inviável ou inaceitável. O conceito de restrições booleanas (ou lógicas) é a abordagem mais frequentemente utilizada para identificar conjuntos de alternativas viáveis nos procedimentos multicritério baseados em SIG (EASTMAN *et al.*, 1993; HEYWOOD, CORNELIUS; CARVER, 2006; MALCZEWSKI, 2015).

Para tornar o entendimento mais claro, pode ser tomando como exemplo um caso de localização de uma indústria numa determinada área. A indústria deverá se localizar “fora de áreas de preservação permanente” ou “em áreas com declividade menor do que 10%”. Essas limitações impostas às alternativas são exemplos de restrições booleanas. Para o presente trabalho, não foram utilizados critérios restritivos às alternativas, levando-se em conta a dominância de cada alternativa em relação às demais alternativas, no conjunto daquelas consideradas factíveis ou viáveis.

A alternativa pode ser representada na forma de pontos, linhas, polígonos (vetores) ou matriz (imagem), relacionando-se com o problema que se quer resolver e com o formato das informações geográficas a serem utilizadas. Além disso, na maioria dos casos, as alternativas possuem natureza e grandezas diferentes. Por exemplo, para estabelecimento do Índice de Gravidade da Infração Ambiental, foram considerados critérios como declividade (%), distância de vias e recursos hídricos (m), classes de solo (vulnerabilidade ambiental), dentre outros critérios. Diante disso, torna-se necessária a compatibilização dos dados, de forma que eles se tornem comparáveis, o que demanda o emprego de técnicas de normalização. Diversos métodos de normalização são abordados na literatura relacionada ao tema (MALCZEWSKI, 1999; MALCZEWSKI, 2000; FUJITA *et al.*, 2006; ESRI, 2008; FERNÁNDEZ; LUTZ, 2010; PEDRYCZ; EKEL; PARREIRAS, 2011; PATRO; SAHU, 2015; MALCZEWSKI; RINNER, 2015; RAHMATI *et al.*, 2016; GIGOVIĆ *et al.*, 2017; BASAN *et al.*, 2022).

O processo de ponderação ou atribuição de pesos refere-se à prioridade atribuída a cada elemento, constituindo-se em um valor designado a um critério de avaliação evidenciando sua relevância quando comparado aos demais critérios sob análise. Do ponto de vista da Análise Multicritério Espacial, existem diversos métodos para avaliação de pesos de critérios, tais como, ordenação (MUSSOI; TEIVE, 2021; HEZAM *et al.*, 2023), classificação (JANKOWSKI *et al.*, 2008; OZTURK; BATUK, 2011; SARI, GERNOWO; SUSENO, 2018), comparação

pareada (SAATY, 1980;2004; SAATY; VARGAS, 1982), dentre outros. Neste trabalho, adotou-se uma abordagem de comparação pareada por meio de combinação do método AHP (SAATY, 1980) com a abordagem *fuzzy*, a ser detalhado na seção da metodologia.

Por fim, quanto às regras de decisão ou de combinação, estas são entendidas como procedimentos ou métodos para avaliar e ordenar um conjunto de alternativas de decisão. De acordo com Malczewski e Rinner (2015), as regras de decisão integram os dados e informações sobre as alternativas (mapas dos critérios) e as preferências dos tomadores de decisão através dos pesos atribuídos aos critérios por meio da avaliação das alternativas. As regras de decisão podem ser aplicadas mediante diferentes métodos.

Os métodos compensatórios e não compensatórios distinguem-se em relação à compensação entre os critérios de avaliação, sendo que os compensatórios permitem que valores baixos em um critério sejam compensados em valores altos em outro, ao contrário dos métodos não compensatórios que ignoram os valores dos pesos entre os critérios, operando numa perspectiva booleana. O método da CLP (Combinação Linear Ponderada) configura um exemplo de método compensatório no contexto da análise multicritério espacial (MALCZEWSKI, 1999; MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

As regras de decisão também podem ser distinguidas por meio de Modelos de Decisão Multiatributo (ou Multicritério) – MDMA e Modelos de Decisão Multiobjetivo – MDMO.

Os Modelos de Decisão Multiatributo envolvem um conjunto pequeno e discreto de objetivos e consideram aqueles critérios a serem utilizados para o atendimento dos objetivos estabelecidos, caracterizando-se por um conjunto pequeno de alternativas explicitamente definidas através das suas valorações, segundo os vários critérios (ZUFFO, 1998).

Os Modelos de Decisão Multiobjetivo, por sua vez, podem ser entendidos como uma extensão das técnicas de programação matemática, e tornam-se particularmente adequados a problemas em que são consideradas, simultaneamente, várias funções objetivo, considerando um conjunto infinito de alternativas contínuas que são geradas por programação matemática e não sendo conhecidas *a priori* as alternativas a serem avaliadas (MATZENAUER, 2003).

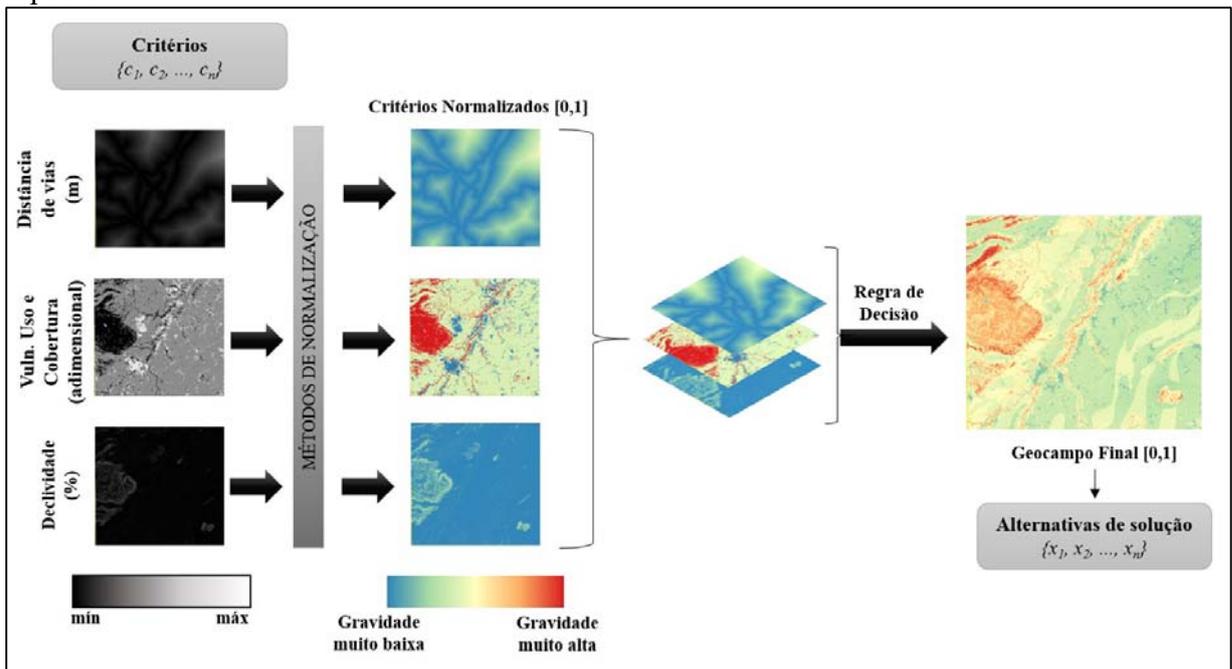
O Quadro 3 apresenta uma comparação entre as principais características dos Modelos de Decisão Multiatributo – MDMA e Modelos de Decisão Multiobjetivo – MDMO.

Quadro 3 - Comparação de Modelos de Decisão Multiatributo – MDMA e Modelos de Decisão Multiobjetivo – MDMO

Condição	MDMA	MDMO
Critérios definidos através de	Atributos	Objetivos
Objetivos definidos	Implicitamente	Explicitamente
Atributos definidos	Explicitamente	Implicitamente
Restrições definidas	Implícita ou Explícitamente	Explicitamente
Alternativas definidas	Explicitamente	Implicitamente
Exemplos de métodos	Combinação linear ponderada; <i>Analytic Hierarchy Process</i> (AHP); <i>Analytic Network Method</i> (ANP); ELECTRE, PROMETHEE (métodos de ordenação)	Programação linear/inteira Programação de metas Programação de compromisso Programação paramétrica Heurísticas/metaheurísticas
Exemplos de problemas de decisão espaciais	Seleção alternativas locacionais; Uso do solo/adequação; Análise de vulnerabilidade; Avaliação de impacto ambiental	Busca de áreas; Localização-alocação; Problema de transporte; Problema de caminho de custo mínimo.

Fonte: Adaptado de Malczewski e Rinner (2015).

Figura 6 - Esquematisação dos conceitos utilizados na aplicação da análise multicritério espacial



Fonte: Adaptado de Silva (2020).

A Figura 6 mostra os conceitos abordados nesta seção, contextualizando as etapas de aplicação da análise multicritério espacial, cujos tomadores de decisão participam desde a definição dos critérios até a obtenção do produto final.

2.7 Métodos de Decisão Multiatributo (ou Multicritério) Espacial - MDMAE

Ren e Sovacool *et al.* (2014) definem os métodos multicritérios de apoio à decisão como um conjunto de procedimentos lógicos que visam construir modelos com vistas a orientar o tomador de decisão quanto à escolha de alternativas.

Apesar do grande número de métodos de análise multicritério disponíveis, as pesquisas teórica e aplicada sobre MDMAE têm se concentrado em um número relativamente pequeno de procedimentos multiatributo, que incluem: a Combinação Linear Ponderada (CLP), métodos de ponto ideal, o Processo Hierárquico Analítico/Processo de Rede Analítica (AHP/ANP) e métodos de superação (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

A seguir, será feita uma breve explanação dos Métodos de Decisão Multiatributo (ou Multicritério) Espacial – MDMAE no contexto da Combinação Linear Ponderada (CLP) e do Processo Hierárquico Analítico (AHP).

2.7.1 Combinação Linear Ponderada - CLP

O método de Combinação Linear Ponderada (CLP) e seus modelos relacionados são os métodos mais utilizados na análise multicritério, por ser considerado um método prático e eficiente (MALCZEWSKI, 2004; MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Outros termos tais como Ponderação Aditiva Simples, Somatório Ponderado, Média Linear Ponderada e Sobreposição Ponderada também têm sido utilizados para descrever o método CLP (MALCZEWSKI, 2006).

A depender dos objetivos, a CLP pode apresentar variações como a CLP Ajustada pela Proximidade, CLP Local e CLP com Média Ponderada Ordenada.

2.7.1.1 Combinação Linear Ponderada - CLP

No método de Combinação Linear Ponderada (CLP) as alternativas são avaliadas em relação a múltiplos critérios, e a importância relativa de cada critério é expressa em termos de pesos. A combinação linear dos valores dos critérios ponderados pelos seus respectivos pesos é então usada para avaliar cada alternativa.

De acordo com Almeida *et al.* (2020), sua característica principal é a compensação dos pesos dos fatores por meio da ponderação, ou seja, um valor muito baixo atribuído a um

fator pode ser compensado por um valor mais alto aplicado a outros fatores.

Trata-se de um procedimento de combinação de mapas que associa um conjunto de pesos de critérios (w_1, w_2, \dots, w_n) à i -ésima alternativa de decisão (localização) e combina os pesos com os valores dos critérios (atributos) (a_1, a_2, \dots, a_n , com $i = 1, 2, \dots, n$), representado pela Equação 1:

$$V(A_i) = \sum_{k=1}^n w_k v(a_{ik}) \quad (1)$$

Onde, $V(A_i)$ é o valor global da i -ésima alternativa numa determinada coordenada x_i, y_i , ou seja, a localização da i -ésima alternativa; w_k é o peso do k -ésimo atributo; $v(a_{ik})$ é o valor da i -ésima alternativa em relacionada ao k -ésimo atributo normalizada pela função de valor, conforme Equações 2 e 3 (MALCZEWSKI, 2011):

$$v(a_{ik}) = \left(\frac{a_{ik} - \underset{i}{\text{mín}}\{a_{ik}\}}{r_k} \right), \text{ para o } k - \text{ésimo critério a ser maximizado} \quad (2)$$

$$v(a_{ik}) = \left(\frac{\underset{i}{\text{máx}}\{a_{ik}\} - a_{ik}}{r_k} \right), \text{ para o } k - \text{ésimo critério a ser minimizado} \quad (3)$$

Onde, $\underset{i}{\text{mín}}\{a_{ik}\}$ e $\underset{i}{\text{máx}}\{a_{ik}\}$ são os valores mínimo e máximo do k -ésimo critério, respectivamente; $r_k = \underset{i}{\text{mín}}\{a_{ik}\} - \underset{i}{\text{máx}}\{a_{ik}\}$ é a amplitude do k -ésimo critério, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $v(a_{ik})$ variam de 0 a 1, sendo 0 o valor do resultado menos desejável e 1 é o valor atribuído ao resultado mais desejável.

Portanto, a variável w_k expressa a importância relativa do atributo e $v(a_{ik})$ designa o valor da alternativa contida no atributo, sendo, por exemplo, no caso de uma imagem, o valor do seu pixel na coordenada x_i, y_i , normalizado pela função de valor. Assim, $V(A_i)$ expressa o somatório do produto dos pixels de cada critério (atributo) pela importância relativa do próprio atributo.

2.7.1.2 Combinação Linear Ponderada Ajustada pela Proximidade

O método da Combinação Linear Ponderada Ajustada pela Proximidade é uma variação da CLP que enfatiza o ajuste de preferência e pesos baseando-se na relação entre as alternativas e suas referências locais, sendo importante quando as relações espaciais e locais

influenciam nos resultados das decisões (LIGMANN-ZIELINSKA; JANKOWSKI, 2012).

Da mesma forma, o processo de normalização dos dados leva em conta os conceitos de Pesos de Critérios Ajustados pela Proximidade (LIGMANN-ZIELINSKA; JANKOWSKI, 2012), sendo a importância relativa medida pelo peso global do atributo w_k e o efeito do componente espacial avaliado por meio de uma função de decaimento de distância (MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Portanto, quanto mais próxima uma alternativa estiver de um local de referência, maior será o valor do peso do critério.

O Peso de Critério Ajustado pela Proximidade w_{ik} relacionado à i -ésima alternativa do k -ésimo critério é definido pela Equação 4:

$$w_{ik} = w_k \frac{d_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m d_{ij}^s} \quad (4)$$

Onde, w_k é o peso global do critério, que pode ser estimado pelo método de Combinação Linear Ponderada (CLP) ou outro método de ponderação global de critérios; d_{ij} é a distância entre a i -ésima alternativa e o j -ésimo local de referência; d_{ij}^s é a distância padronizada para um par de localização i e j (Equação 5).

$$d_{ij}^s = \frac{\min_i \{d_{ij}\}}{d_{ij}} \quad (5)$$

O peso do critério ajustado pela proximidade é função o peso global modificado pela distância normalizada entre o par de localização (MALCZEWSKI; RINNER, 2015). Em outras palavras, o peso de cada atributo se ajusta à proximidade da alternativa em relação a um ponto de referência, permitindo, nos casos em que o fator de localização espacial seja decisivo, que a análise seja mais refinada e contextualizada, de forma que, numa imagem, por exemplo, as alternativas (valores dos pixels) mais próximas aos locais de referência tenham valores (pesos) maiores, refletindo uma preferência ou um viés espacial na análise de decisão multicritério.

2.7.1.3 Combinação Linear Ponderada Local

Malczewski (2011) introduziu uma regra local de decisão para a Combinação Linear Ponderada, argumentando que o “*trade off*” ou equilíbrio os pesos atribuídos pelo tomador de decisão entre os critérios não é uniforme em todo o espaço, considerando que o alcance de um determinado critério varia no espaço.

A forma local da CLP proposta simula esse comportamento de equilíbrio alterando os pesos atribuídos aos critérios e ao procedimento de normalização, ajustando o valor do atributo no contexto local (CARTER; RINER, 2013).

A forma local da CLP é expressa na Equação 6 (Malczewski, 2011):

$$V(A_i^q) = \sum_{k=1}^n w_k^q v(A_{ik}^q) \quad (6)$$

Onde, $V(A_i^q)$ representa a pontuação total da i -ésima alternativa dentro da q -ésima vizinhança; w_k^q representa o peso ajustado localmente atribuído ao k -ésimo critério dentro da q -ésima vizinhança; e $v(A_{ik}^q)$ representa o valor do k -ésimo critério medido por meio da função de valor local na q -ésima vizinhança (Equação 6).

Considerando a variação do peso local, w_{qk} é uma função para definição da amplitude do critério local, conforme Equação 7 (MALCZEWSKI, 2011; CARTER; RINNER, 2013):

$$w_{qk} = \frac{\frac{w_k r_k^q}{r_k}}{\sum_{k=1}^n \frac{w_k r_k^q}{r_k}} \quad (7)$$

Onde, w_k é o valor global do k -ésimo critério; r_k^q é a amplitude local, representada pelos valores das alternativas do k -ésimo critério dentro da q -ésima vizinhança; r_k é a amplitude global do k -ésimo critério. O peso local é padronizado por meio da divisão pela soma de todos os pesos dos critérios locais (k) para cada alternativa de maneira que o peso local se situe no intervalo $0 \leq w_{qk} \leq 1$ e a soma de todos os pesos locais $\sum_{k=1}^n \frac{w_k r_k^q}{r_k}$ seja igual a 1.

A função local $v(a_{ik}^q)$ converte diferentes níveis do k -ésimo critério associado às alternativas localizadas na q -ésima vizinhança. Da mesma forma que na função de valor global, o método da amplitude dos valores é usado na estimação da função do valor local, transformando o arquivo raster de entrada em *scores* padronizados. Para isto, utilizam-se a Equações 8 e 9 (MALCZEWSKI, 2011):

$$v(a_{ik}^q) = \left(\frac{a_{ik}^q - \min_{i,q}\{a_{ik}^q\}}{r_k^q} \right), \text{ para o } k - \text{ésimo critério a ser maximizado} \quad (8)$$

$$v(a_{ik}^q) = \left(\frac{\max_{i,q}\{a_{ik}^q\} - a_{ik}^q}{r_k^q} \right), \text{ para o } k - \text{ésimo critério a ser minimizado} \quad (9)$$

Onde, $\min_{i,q}\{a_{ik}^q\}$ e $\max_{i,q}\{a_{ik}^q\}$ são os valores mínimo e máximo do k -ésimo critério na q -ésima vizinhança, respectivamente; $r_k^q = \max_{i,q}\{a_{ik}^q\} - \min_{i,q}\{a_{ik}^q\}$ é a amplitude local, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $v(a_{ik}^q)$ variam de 0 a 1, sendo 0 o valor do resultado menos desejável e 1 é o valor atribuído ao resultado mais desejável para a alternativa na q -ésima vizinhança.

Em cada vizinhança do espaço analisado, os critérios podem assumir pesos diferentes, em razão da sua importância relativa no local específico. A padronização dos critérios considera os valores dentro do espaço da vizinhança. Esse método leva em conta as variações locais na importância e nos valores dos critérios, permitindo uma análise mais adaptada à realidade dos dados quando comparado à abordagem global, que se utiliza de pesos e valores de todo o espaço analisado.

2.7.2 Média Ponderada Ordenada - MPO

A Média Ponderada Ordenada (*Ordered Weighted Averaging*), inicialmente proposta por Yager (1988) no contexto da teoria dos conjuntos *fuzzy* e apresentada por Jiang e Eastman (2000) no contexto dos sistemas de informação geográfica, fornece uma extensão e generalização das operações booleanas e dos procedimentos da CLP (MALCZEWSKI, 2006; JIANG; EASTMAN, 2000), e procedimentos para a combinação de critérios (atributos), visando a determinação das melhores alternativas de solução para um determinado problema (SANTOS, 2020).

Dado um conjunto de um conjunto de critérios (c_1, c_2, \dots, c_n) , a MPO é um procedimento de combinação de mapas que associa dois tipos de pesos: um conjunto de pesos de critérios (w_1, w_2, \dots, w_n) e um conjunto de pesos ordenados $(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$, onde $\lambda_k \in [0,1]$, $\sum_{k=1}^n \lambda_k = 1$. Dado um conjunto de alternativas de decisão $(a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})$, com $i = 1, 2, \dots, n$, geograficamente definidas (raster ou vetor), o operador MPO pode ser definido conforme a Equação 10 (MALCZEWSKI, 2006):

$$V(A_i^O) = \sum_{k=1}^n \frac{\lambda_k u_k z_{ik}}{\sum_{k=1}^n \lambda_k u_k} \quad (10)$$

Onde, $V(A_i^O)$ é o valor global da i -ésima localização (alternativa); z_{ik} corresponde à sequência gerada pela reordenação dos valores das alternativas padronizadas, ou seja, para o k -ésimo critério, as alternativas $a_{1k}, a_{2k}, \dots, a_{mk}$ são transformadas para $v_k(a_1), v_k(a_2), \dots, v_k(a_m)$, por meio das Equações 11 e 12; u_k é o peso do critério reordenado de acordo com o valor do critério z_{ik} .

$$v(a_{ik}) = \left(\frac{a_{ik} - \min_i \{a_{ik}\}}{r_k} \right)^\rho, \text{ para o } k - \text{ésimo critério a ser maximizado} \quad (11)$$

$$v(a_{ik}) = \left(\frac{\max_i \{a_{ik}\} - a_{ik}}{r_k} \right)^\rho, \text{ para o } k - \text{ésimo critério a ser minimizado} \quad (12)$$

Onde, $\min_i \{a_{ik}\}$ e $\max_i \{a_{ik}\}$ são os valores mínimo e máximo do k -ésimo critério, respectivamente; $r_k^q = \max_i \{a_{ik}\} - \min_i \{a_{ik}\}$ é a amplitude do k -ésimo critério, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $v(a_{ik})$ variam de 0 a 1, sendo 0 o valor do resultado menos desejável e 1 é o valor atribuído ao resultado mais desejável.

A variável ρ refere-se à forma da função de valor e é determinada pelas preferências dos tomadores de decisão. Em problemas de decisão espacial, normalmente assume-se que a função se comporta de forma linear, de maneira que ρ assume valor 1, sendo a forma linear da função de valor a amplitude dos valores dos pesos. (MALCZEWSKI, 2000, 2006).

Visando tornar mais claro o entendimento do método MPO, Malczewski e Riner (2015) apresentam um exemplo numérico com a aplicação do método na forma de tabela apresentando todas as variáveis da Equação 10, bem como um maior detalhamento do método.

2.7.3 Analytic Hierarchy Process - AHP

O *Analytic Hierarchy Process* – AHP é um método de análise multicritério que permite aos decisores avaliar e priorizar alternativas com base em critérios e subcritérios hierarquicamente organizados. Desenvolvido por Thomas Saaty na década de 1970, o AHP é amplamente utilizado em diversas áreas, incluindo gestão empresarial, engenharia, saúde, educação e meio ambiente.

O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP) é uma abordagem de tomada de decisão multicritério que ajuda a avaliar alternativas em relação a critérios específicos. É dividido em três princípios: (1) decomposição do problema, (2) julgamento comparativo par a par, (3) determinação de prioridades relativas.

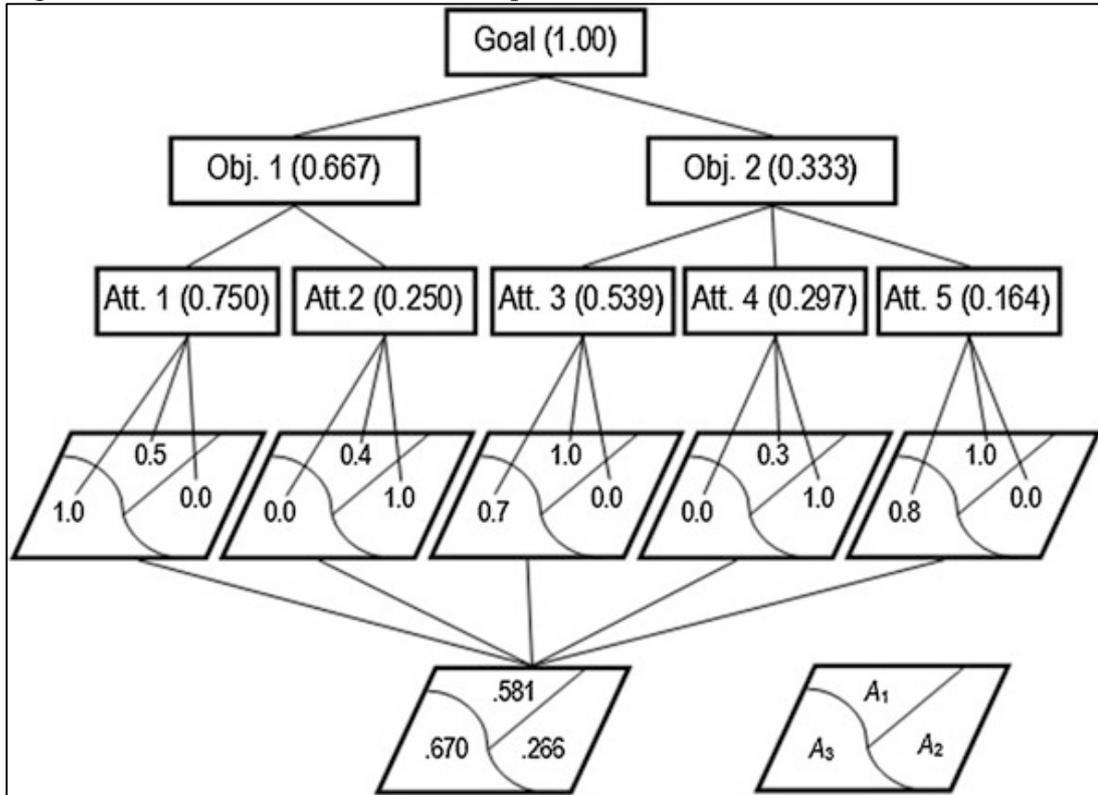
O AHP convencional é um método global. Para uma estrutura hierárquica típica (que consiste em um objetivo, metas, atributos e alternativas), o modelo global AHP define a pontuação de avaliação geral (ou classificação de prioridade) com base na Equação 13 (MALCZEWSKI; RINER, 2015):

$$V(A_i) = \sum_{k=1}^n w_l w_{k(l)} v(a_{ik}) \quad (13)$$

Onde, $V(A_i)$ é o valor global da alternativa na i -ésima localização; w_l consiste no peso associado ao l -ésimo objetivo ($l = 1, 2, \dots, n$); $w_{k(l)}$ consiste no peso atribuídos ao k -ésimo atributo associado ao l -ésimo objetivo; $v(a_{ik})$ é a função de valor para normalizar a alternativa (Equações 2 e 3). Os pesos do objetivo e critério também devem passar por processo de normalização. Saaty (1980) fornece vários métodos para normalização de pesos de critérios.

A Figura 7 mostra uma estrutura de um modelo AHP espacial, onde os valores dos objetivos (Obj.), atributos (Att.) e alternativas (A_1 , A_2 e A_3) são apresentados na forma padronizada/normalizada.

Figura 7 - Estrutura do modelo AHP espacial



Fonte: Malczewski e Riner (2015).

Para agregação dos pesos através do uso da Equação 13, os objetivos e atributos foram normalizados por meio da divisão de cada valor de peso pelo somatório dos pesos dos objetivos e atributos. As alternativas, que são as informações da realidade representadas no geocampo, são normalizadas com base na amplitude global dos dados, e em seguida, é aplicada a Equação 1.

O método AHP equivale à CLP através dos pesos definidos pela comparação pareada, apresentando como principal vantagem o foco no tomador de decisão no processo de desenvolvimento da estrutura da decisão. O processo de ranqueamento de critérios por meio do método AHP será tratado na seção 3.4.

2.8 Aplicação da teoria dos conjuntos fuzzy na análise multicritério espacial

2.8.1 Teoria dos conjuntos fuzzy

Uma outra abordagem relacionada aos métodos de tomada de decisão multicritério é a teoria dos conjuntos *fuzzy*, que se baseia no reconhecimento de que a incerteza, imprecisão e ambiguidade são aspectos inerentes à tomada de decisão (MATZENAUER, 2003).

Ao usar nossa linguagem natural cotidiana para transmitir conhecimento e informação, há muita imprecisão. Afirmações do tipo “A sala está muito fria” e “Alguém é jovem” são exemplos simples, cuja principal preocupação é representar, manipular e inferir informações dessas declarações imprecisas. A teoria e a aplicação de conceitos *fuzzy* são bastante importantes para trabalhar com essas questões.

Várias técnicas relacionadas à resolução de problemas que envolvem tomada de decisão com base em múltiplos critérios foram desenvolvidas ou adaptadas tendo-se como referência a Teoria dos Conjuntos *Fuzzy* (TCF), normalmente referenciadas genericamente como “abordagens *fuzzy*”.

O conceito de “Conjuntos *Fuzzy*” foi introduzido por Zadeh (1965) que são conjuntos com amplitudes imprecisas. O autor afirma que a “pertinência” em um conjunto difuso não é uma questão de afirmação ou negação, mas sim uma questão de grau. Ao longo dos últimos cinquenta anos, sua proposta ganhou reconhecimento como um ponto importante na evolução do conceito moderno de imprecisão e incerteza e sua inovação representa uma mudança de paradigma dos conjuntos clássicos ou dos conjuntos *crisp* para “Conjuntos *Fuzzy*” (CELIKYILMAZ; TÜRKSEN, 2009).

A teoria dos conjuntos *fuzzy* e da lógica *fuzzy* são teorias renomadas, com as quais se pode capturar o fenômeno natural da imprecisão e incerteza do pensamento humano, expandindo a lógica tradicional ao incluir instâncias da verdade parcial, podendo ser utilizada para lidar com problemas difusos e incertos no mundo real (ZADEH, 1965; STEFANO, 2014; JIANG *et al.*, 2020) produzindo ferramentas capazes de capturar informações vagas, em geral, descritas em uma linguagem natural, e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação por meio de computadores (ZADEH, 2008; CHANG; WANG, 2009; LIN *et al.*, 2016), tendo uma ampla variedade de aplicações, desde inteligência artificial, ciência da computação, engenharia de controle, sistemas especializados, gestão, inclusive em processos de tomada de decisão, permitindo a aproximação da decisão por meio de ferramentas computacionais da decisão humana.

Comparada com a teoria dos conjuntos convencional, a teoria dos conjuntos *fuzzy* pode descrever a incerteza dos dados substituindo uma função característica por uma função de pertinência (JIANG *et al.*, 2020) que é uma função cujo alcance é um conjunto de pertinência ordenado dentro do intervalo unitário fechado (CELIKYILMAZ; TÜRKSEN, 2009).

Na Teoria Clássica dos Conjuntos, uma função característica define o pertencimento (ou pertinência) de determinados elementos a um conjunto. Um conjunto

“clássico” é uma coleção de objetos distintos definido de forma a particionar os objetos de um determinado universo de discurso em dois grupos: membros (aqueles que pertencem a um determinado conjunto) e não-membros (aqueles que não pertencem a determinado conjunto). Assim, na teoria dos conjuntos tradicional (*crisp*), existe uma distinção nítida entre membros e não membros de um conjunto (ZADEH, 1965; 2008; CELIKYILMAZ; TÜRKSEN, 2009).

Stefano (2014) afirma que o raciocínio exato corresponde a um limite do raciocínio aproximado, sendo interpretado como um processo de composição de relações nebulosas. Tradicionalmente, uma proposição lógica possui dois extremos: ou “completamente verdadeiro” ou “completamente falso”. Na lógica *fuzzy*, uma premissa varia seu grau de verdade de 0 a 1, o que leva a ser parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

No conjunto *fuzzy*, o grau de pertinência de cada elemento é definido por uma função de pertinência, cujos valores possíveis variam numa escala de 0 a 1, estando relacionado ao grau de pertencimento, ou seja, a pertinência deve ser um elemento do intervalo $[0, 1]$, de maneira que os valores de associação representem o grau em que um objeto pertence a um conjunto *fuzzy* (NGUYEN, 2021). A função de pertinência é representada na Equação 14:

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]; x \in X \quad (14)$$

Seja X o universo do discurso, onde x representa um elemento do universo, X e A denotam um conjunto *fuzzy*, caracterizado por sua função de pertinência, $\mu_A(x)$.

De acordo com a função de pertinência mostrada na Equação 14 os valores atribuídos aos elementos x do conjunto X estão dentro de um intervalo especificado, indicando o grau de pertinência desses elementos no conjunto *fuzzy* A , que também pode ser definido como conjuntos de pares ordenados (CELIKYILMAZ; TÜRKSEN, 2009), onde o primeiro elemento denota o elemento em si e o segundo o seu grau de pertencimento, conforme Equação 15:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\} \quad (15)$$

Em aplicações da vida real, os valores de pertinência formam nuvens de dispersão, de forma que os conjuntos *fuzzy* podem ser utilizados como ferramentas de normalização uniformizando seus valores por meio da escala unitária estabelecendo o seu grau de pertinência. As funções mais comuns são trapezoidais, gaussianas, triangulares, sigmóides e lineares (SÁNCHEZ-LOSANO *et al.*, 2022).

Os conjuntos *fuzzy* são aplicados neste trabalho para representar matematicamente geocampos $g_i(x)$ por meio da atribuição a cada par de coordenada um valor unitário no

intervalo $[0,1]$, para estabelecer o seu grau de associação, visando a normalização dos valores das alternativas dos atributos.

O processo de normalização envolve a construção de conjuntos *fuzzy* $A_i(x)$, com $i = 1, \dots, n$ relacionados com a função de associação *fuzzy* $\mu_{A_i}(g_i(x))$, $i = 1, \dots, n$ que associa a localização geográfica x de cada local do i -ésimo geocampo g_i .

As funções mais comuns são gaussianas, sigmóides, lineares, triangulares e trapezoidais (SÁNCHEZ-LOSANO *et al.*, 2022), *fuzzy Small* e *fuzzy Large* (ESRI, 2018). Portanto, diferentes tipos de funções de pertinência podem ser aplicados.

Esses geocampos podem ser gerados a partir de operações sobre outros geocampos e geo-objetos, criando-se individualmente para cada critério um conjunto *fuzzy* e, em seguida, se aplicar operações de agregação visando a combinação das alternativas dos critérios, com vistas a se obter um peso global para cada alternativa de solução.

A literatura apresenta diversas formas de agregação, como verificado em Malczewski e Rinner (2015) e Liu, Eckert e Earl (2020). Para este trabalho, foi utilizada a Combinação Linear Ponderada (CLP) como método principal de agregação de alternativas, apresentada no item 2.7.1.1.

2.8.2 Fuzzy Analytic Hierarchy Process – FAHP

Para lidar com a imprecisão na escala de avaliação do método AHP, números *crisp* são substituídos por números *fuzzy* que representam as expressões linguísticas no AHP *fuzzy*. Isso permite lidar com julgamentos vagos atribuindo graus de pertinência a números *crisp* para descrever em que medida esses números pertencem a uma expressão, sendo adequado para lidar com a incerteza em problemas de tomada de decisão envolvendo subjetividade (KROHLING; SOUZA, 2012; SOMSUK; LAOSIRIHONGTHONG, 2014).

O método FAHP é similar ao método AHP em sua lógica e segue a seguinte estrutura (BALUSA; GORAI, 2018; LYU *et al.*, 2020; GÜLÜM *et al.*, 2021; OLIVEIRA; NUNES, 2022; BHADRAN *et al.*, 2022):

- *Estruturação do Problema*, que é decomposto em uma hierarquia que inclui o objetivo, critérios, subcritérios e alternativas;

- *Estabelecimento da escala de julgamentos* a serem realizados pelo tomador de decisão ou grupo de tomadores de decisão. No FAHP a escala de julgamentos pode ser feita por vários tipos de números *fuzzy* e, dentre eles, destacam-se os números triangulares fuzzy (TFNs),

sendo mais utilizados para fins analíticos, permitindo a representação eficaz e manipulação de variáveis linguísticas (CALABRESE, 2019; LIU; ECKERT; EARL, 2020);

- *Estruturação da Matriz de Comparação Pareada Fuzzy*. Quanto ao processo de comparação de critérios por meio da escala de julgamentos, o par de critérios (C_i , C_j) deve ser representado em uma matriz C de dimensões $n \times n$.

- *Síntese dos Julgamentos e Cálculo dos Pesos Fuzzy dos Critérios*. Caso haja vários especialistas, os julgamentos serão agregados. Há diversos métodos de agregação disponíveis, tais como média geométrica e aritmética, método máx-mín, métodos baseados em graus de consenso, média geométrica de intervalo *fuzzy*, média ponderada com lógica *fuzzy* intuicionista, método *lambda-max*, dentre outros (LIU; ECKERT; EARL, 2020).

- *Desfuzificação dos Pesos Fuzzy*, por meio da conversão para números inteiros (*crisp*). O processo de desfuzificação pode ocorrer pelo método do centroide, método da análise de extensão, dentre outros métodos (LIU; ECKERT; EARL, 2020).

- *Verificação da Consistência*, que ocorre após a matriz de comparação ser estabelecida. A matriz é considerada consistente se as contradições entre as comparações par-a-par estiverem dentro de um limite pré-definido, ou seja, a razão de consistência, devendo ocorrer a reavaliação pelos especialistas caso o limite seja ultrapassado.

- *Definição dos pesos relativos dos critérios* que resultará nos pesos normalizados dos critérios.

Na seção 3.4 serão detalhados os procedimentos adotados para aplicação da abordagem *fuzzy* do método *Analytic Hierarchy Process – FAHP* aplicado aos critérios selecionados no presente trabalho.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo, composto por seis etapas, são apresentados os materiais utilizados, os produtos gerados para o desenvolvimento da pesquisa, bem como a apresentação da área de estudo.

A primeira etapa relaciona-se ao desenvolvimento do modelo inicial para cálculo da multa, considerando os parâmetros gravidade da infração ambiental e potencial poluidor-degradador. A segunda etapa refere-se à construção da estrutura hierárquica para estruturação de um Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA, utilizando métodos e técnicas para identificar critérios e alternativas e sua importância para o índice, como o método FDELPHI e FAHP.

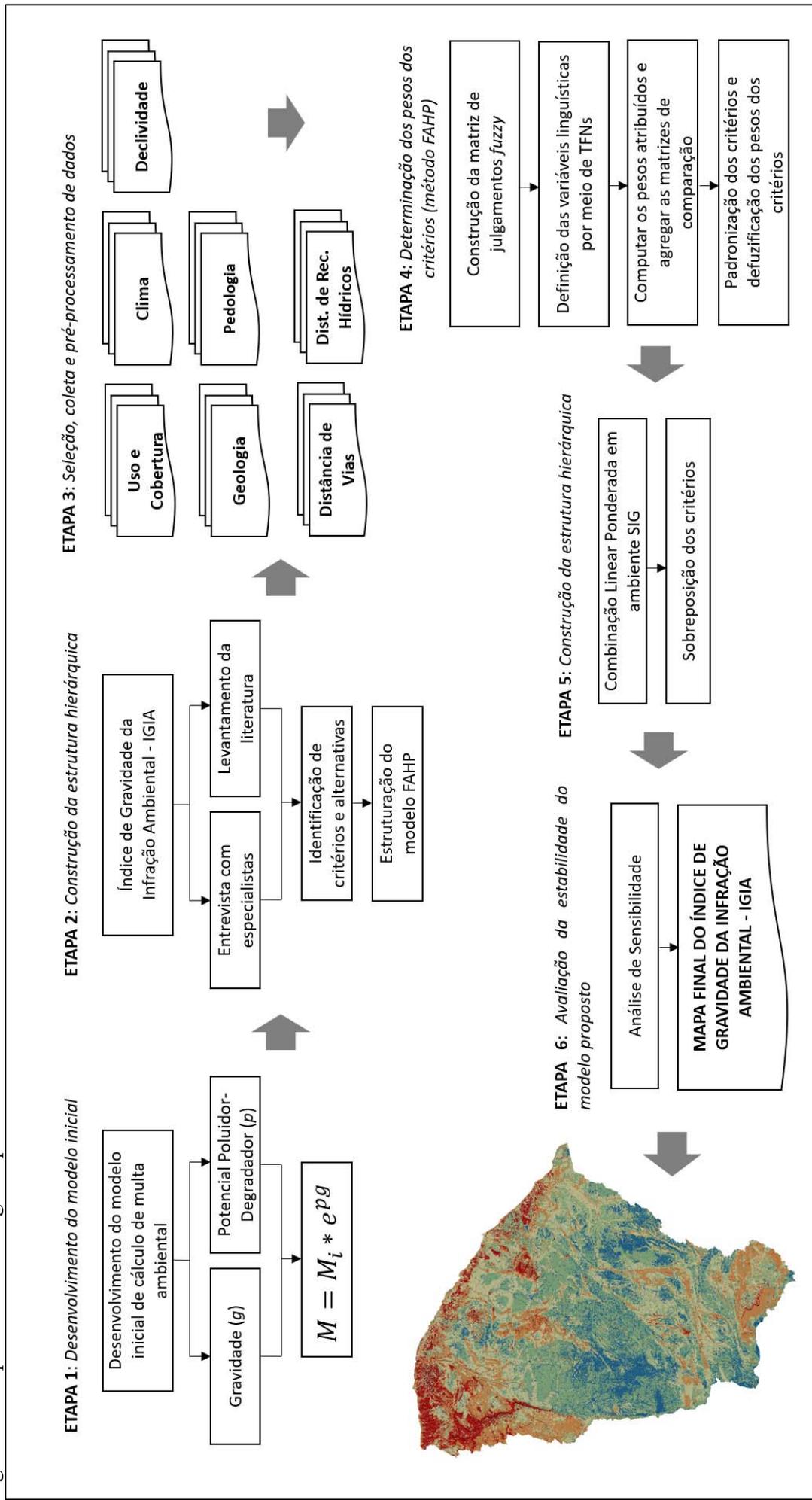
A terceira etapa envolve a coleta e pré-processamento dos dados, concentrando-se nos critérios/atributos selecionados na etapa anterior. A quarta etapa relaciona-se com a determinação da importância relativa ou peso dos critérios por meio de variáveis linguísticas e números *fuzzy* triangulares. Para isto, será estruturada uma matriz para avaliação pelos especialistas entrevistados.

A quinta etapa, trata da importação dos dados produzidos para ambiente SIG, bem como a construção do modelo espacial que representará o Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA.

A sexta e última etapa consiste na avaliação do modelo proposto por meio de uma análise de sensibilidade espacial para verificar a robustez e estabilidade dos pesos atribuídos aos critérios componentes do índice.

A Figura 8 apresenta um esquema da metodologia utilizada no presente trabalho.

Figura 8 - Esquema metodológico aplicado na tese

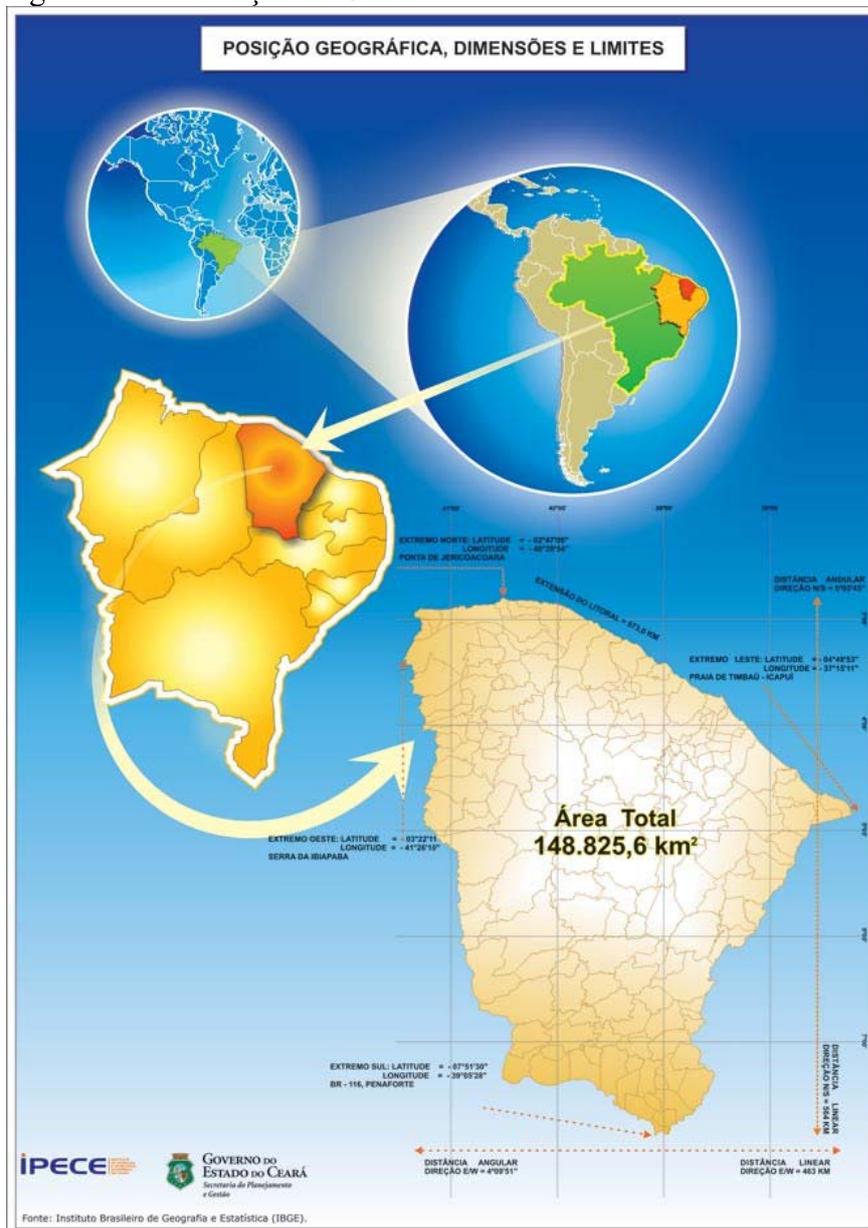


Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Descrição geográfica da área de aplicação

A área selecionada para aplicação do modelo proposto no presente trabalho abrange todo o estado do Ceará, localizado na região Nordeste do Brasil, com uma área de aproximadamente 148.000 km², fazendo fronteira com os estados do Piauí, a leste, Pernambuco, ao sul, Paraíba e Rio Grande do Norte, na porção oeste, sendo banhado pelo Oceano Atlântico em toda sua extensão a norte. A Figura 9 mostra a posição geográfica, dimensões e limites do estado do Ceará.

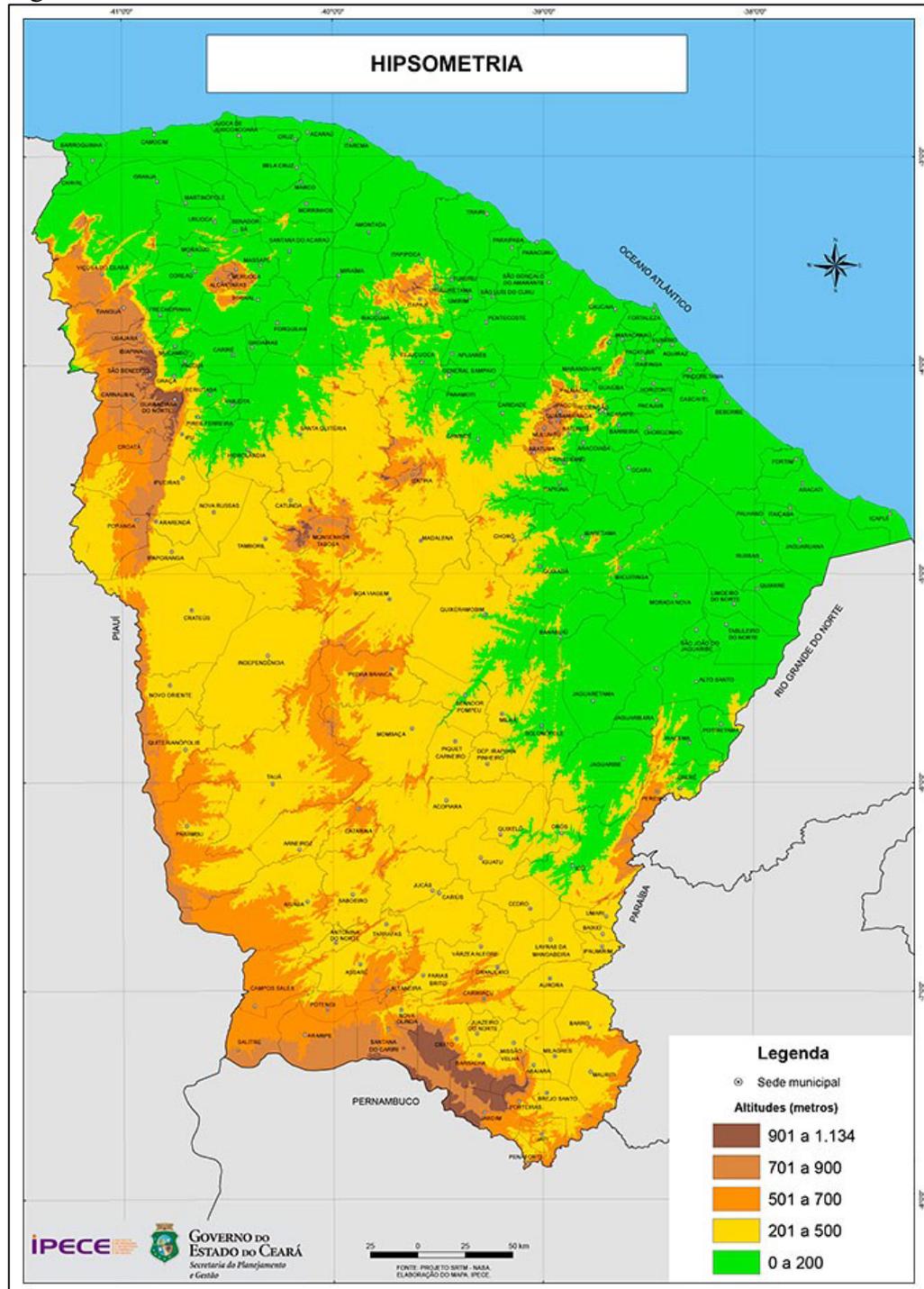
Figura 9 - Localização do Ceará



Fonte: IPECE (2007).

A Figura 10 apresenta a altimetria do estado do Ceará através da qual, observa-se que as regiões mais altas localizam-se nas porções oeste e sul, bem como em maciços residuais que se distribuem de modo disperso pelos sertões semiáridos.

Figura 10 - Altimetria do estado do Ceará

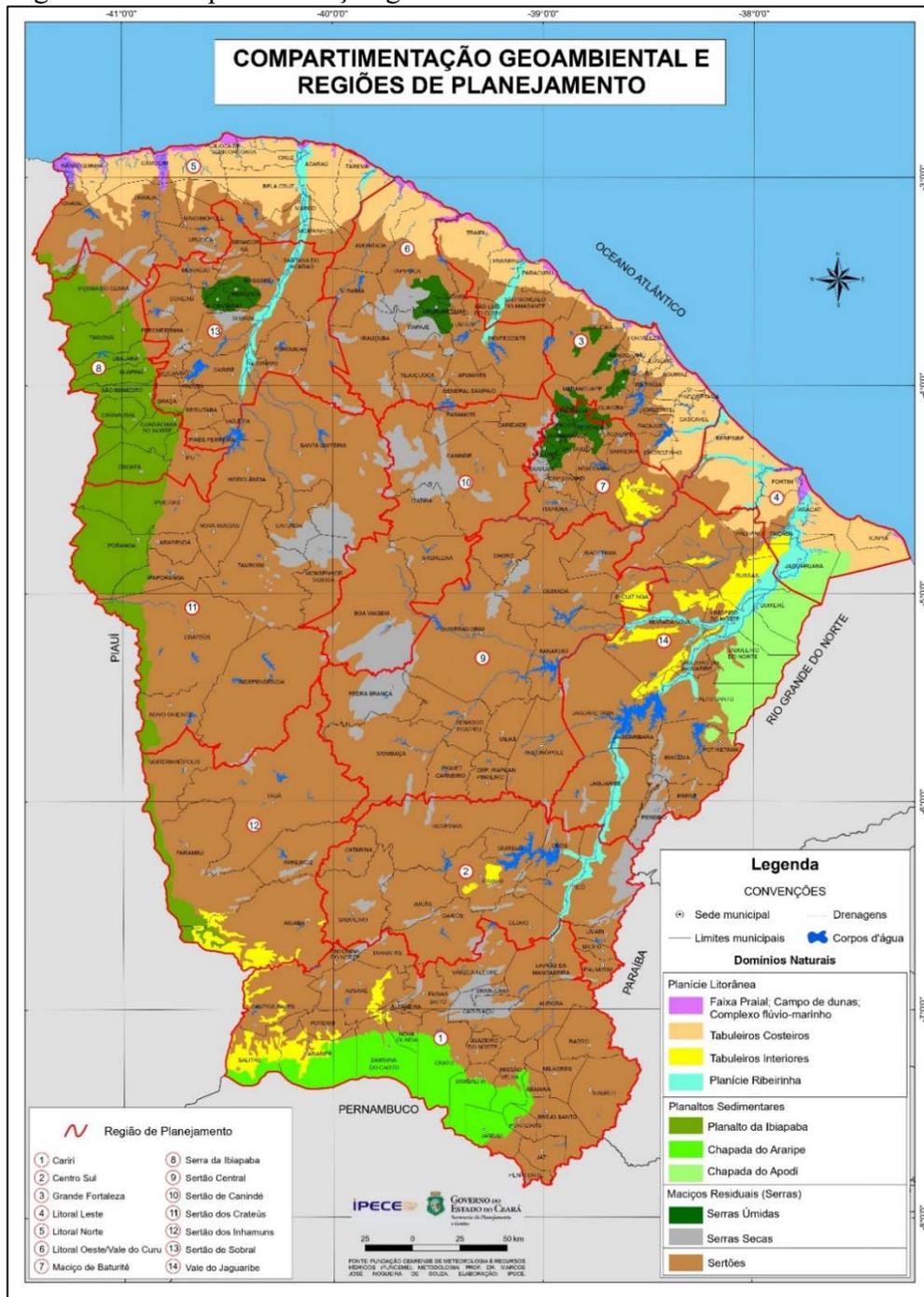


Fonte: IPECE (2007).

O relevo que compõe o Ceará é predominantemente caracterizado por terras posicionadas abaixo dos 200 metros, com superfícies planas a levemente onduladas. As áreas

serranas, incluindo os maciços residuais cristalinos e os planaltos sedimentares que se elevam acima de 700 metros, possuem extensões restritas. Na região costeira, além das formações dunares modeladas em sedimentos contemporâneos, os sedimentos atuais, pertencentes ao Grupo Barreiras, são sutilmente entalhados pela drenagem de superfície, delimitando interflúvios tabulares, os quais correspondem aos tabuleiros litorâneos (SOUZA, 2000; BRANDÃO; FREITAS, 2014). A Figura 11 apresenta a compartimentação geoambiental do Ceará onde pode se notar a extensa área tomada pelos Sertões.

Figura 11 - Compartimentação geoambiental do Ceará



Fonte: IPECE (2007).

De acordo com Brandão e Freitas (2014) o território cearense foi compartimentado em onze domínios geomorfológicos: planície Costeira do Ceará; Planícies aluviais dos rios Jaguaribe e Acaraú; Tabuleiros Costeiros; Chapada do Apodi; Chapada do Araripe; Chapada da Ibiapaba; Depressão Sertaneja I; Depressão Sertaneja II; Depressões em meio à Superfície Sertaneja; Maciços Residuais Cristalinos, sendo este último, subdividido em “serras úmidas” e “serras secas”. Na Tabela 1 são apresentadas as formas de relevo identificadas no Ceará e suas

faixas de declividade.

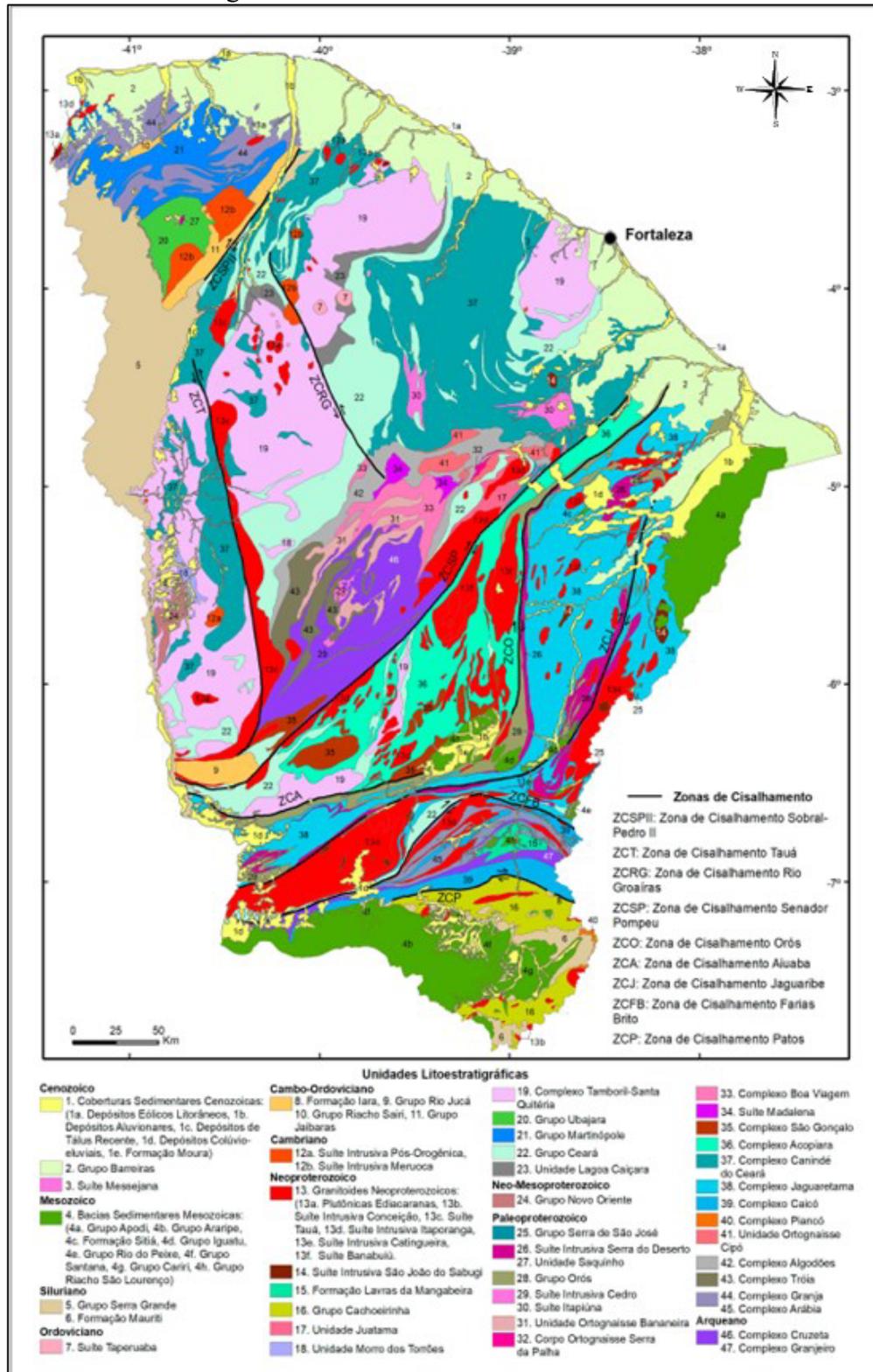
Tabela 1 - Formas de relevo e declividade identificadas no estado do Ceará

Tipo de Relevo	Sigla	Declividade (graus)
Planícies Fluviais ou fluviolacustres	R1a	0 a 3
Vertentes recobertas por depósitos de encosta	R1c	5 a 45
Planícies Fluviomarinhas	R1d	0
Planícies Costeiras	R1e	0 a 5
Campos de Dunas	R1f1	3 a 30
Tabuleiros	R2a1	0 a 3
Tabuleiros Dissecados	R2a2	2 a 5
Baixos Platôs	R2b1	0 a 5
Planaltos	R2b3	0 a 5
Chapadas e Platôs	R2c	0 a 5
Superfícies aplainadas conservadas	R3a1	0 a 5
Superfícies aplainadas degradadas	R3a2	0 a 5
Inselbergs	R3b	25 a 60
Colinas amplas e Suaves	R4a1	3 a 10
Colinas Dissecadas e Morros Baixos	R4a2	5 a 20
Morros e de Serras Baixas	R4b	15 a 35
Montanhoso	R4c	25 a 60
Escarpas Serranas	R4d	25 a 60
Degraus Estruturais e Rebordos Erosivos	R4e	10 a 45
Vales Encaixados	R4f	10 a 45

Fonte: Adaptado de Brandão e Freitas (2014).

Em termos litológicos, o subsolo cearense é constituído por rochas ígneas e metamórficas, genericamente denominadas cristalinas, correspondendo à porção central do estado, sendo bordejado em sua maior parte por rochas sedimentares que foram as bacias do Araripe (sul), Parnaíba (oeste) e Apodi (leste), bem como dos sedimentos da faixa costeira, a norte. A Figura 12 mostra o mapa geológico simplificado do Ceará, com indicação das unidades litoestratigráficas. Essa diversidade litológica é refletida nas formas de relevo que se desenvolveram, na disponibilidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, no potencial mineral e na variedade de solos existentes no estado (SOARES; 2015; BRANDÃO; FREITAS, 2014).

Figura 12 - Mapa geológico simplificado do Ceará, com indicação das unidades litoestratigráficas

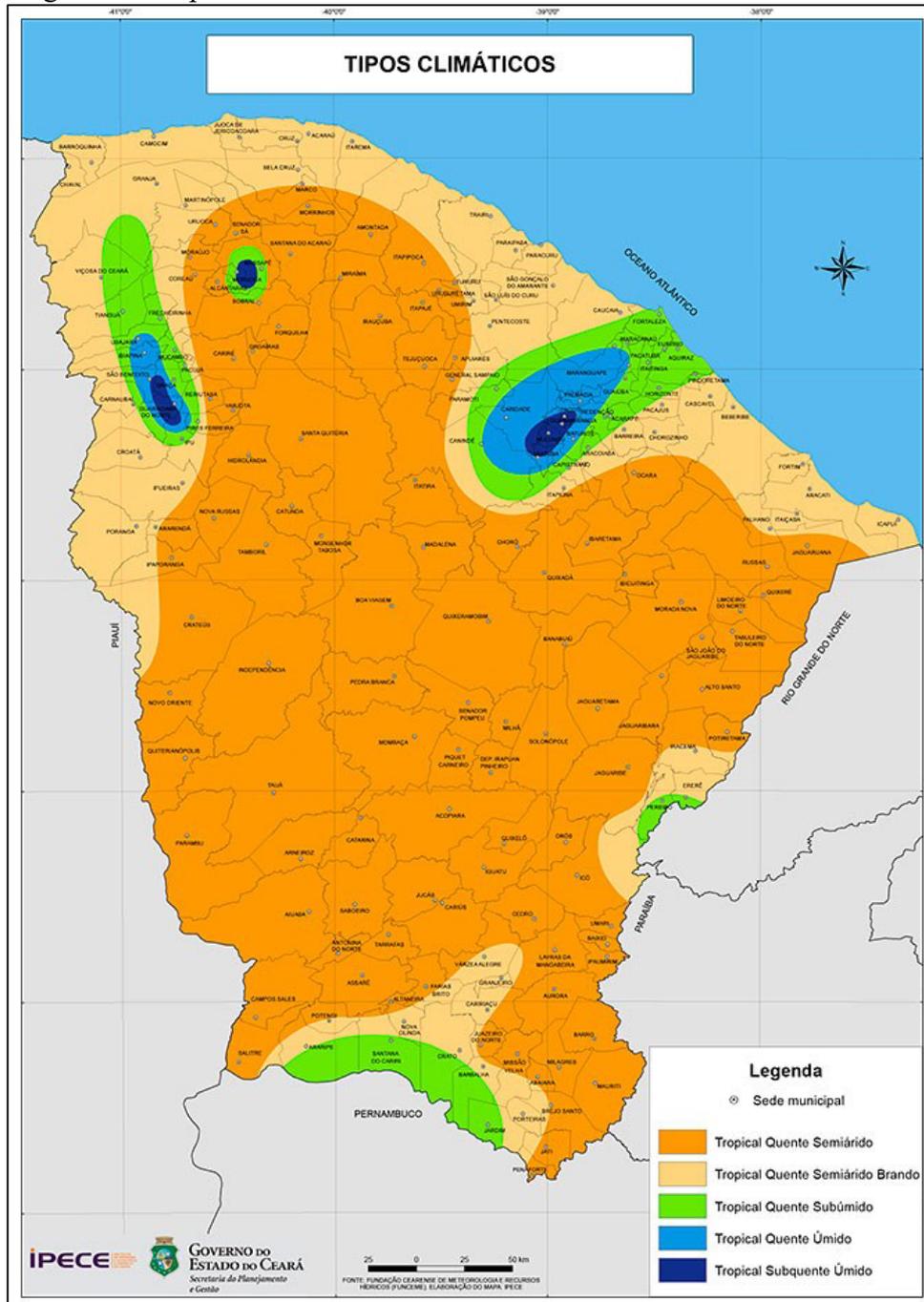


Fonte: CPRM (2021).

O clima cearense, de acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, se caracteriza por dois tipos, o tropical úmido e o semiárido, sendo o semiárido o clima

predominante no estado, estando 93% submetido à influência da semiaridez. Apresenta baixos níveis pluviométricos, com 75% do território inserido na isoieta inferior a 800 mm anuais e altas temperaturas, variando entre 22° e 27°C (NASCIMENTO *et al.*, 2022). A Figura 13 mostra os tipos climáticos do Ceará, com destaque o clima Tropical Quente Semiárido, característico dos Sertões.

Figura 13 - Tipos climáticos do Ceará



Fonte: IPECE (2007).

Os solos do Ceará possuem um mosaico bastante complexo, resultante dos diferentes tipos de combinações entre os seus fatores e processos de formação. Nas áreas sertanejas, a pequena espessura dos solos e a grande ocorrência de afloramentos rochosos e pavimentos pedregosos constituem propriedades típicas do ambiente semiárido das caatingas, apesar da ocorrência de significativas manchas de solos dotados de fertilidade natural média a alta (SOUZA, 2000).

Predominam no estado as classes de solos Argissolos (Amarelos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos), Cambissolos Háplicos, Chernossolo (Argilúvicos, Háplicos e Rêndzicos), Gleissolos (Melânicos e Sálícos), Latossolos (Amarelos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos), Luvisolos Crômicos, Neossolos (Flúvicos, Litólicos, Quartzarênicos, Regolíticos), Nitossolos, Planossos (Háplicos e Nátricos) e Vertissolos (IBGE, 2019). A Tabela 2 mostra os tipos de solo por área e percentual no estado do Ceará. Na Figura 14 pode ser visualizada a disposição dos solos no território do estado.

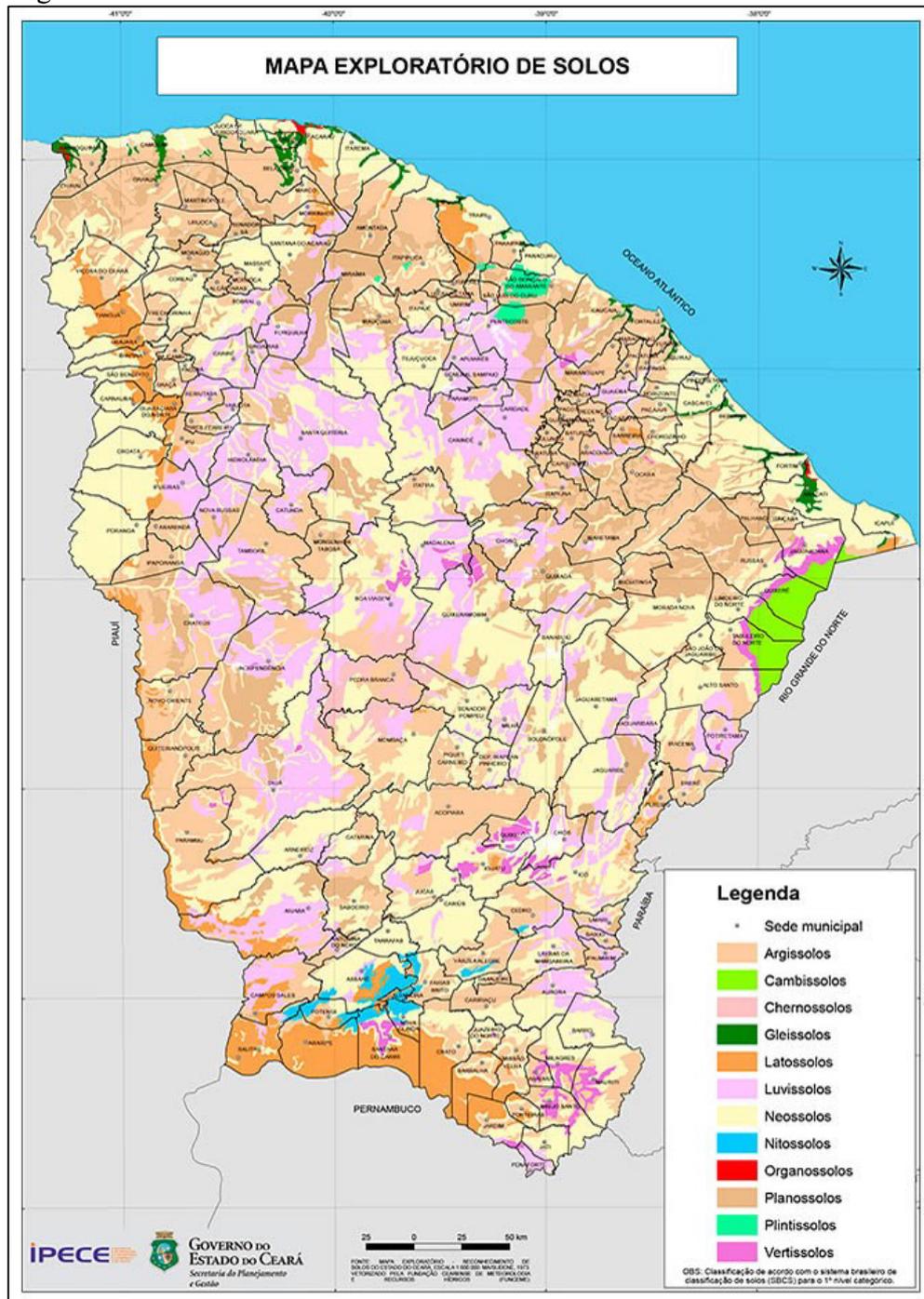
Tabela 2 - Classes de solo por áreas e percentual no estado do Ceará

Classe	Total (km ²)	% CE
Água	2.058,37	1,39%
Afloramento Rochoso	31,97	0,02%
Argissolo Amarelo	7.033,59	4,74%
Argissolo Vermelho	30.135,36	20,32%
Argissolo Vermelho-Amarelo	9.134,34	6,16%
Cambissolo Háplico	1.461,28	0,99%
Chernossolo Háplico	263,29	0,18%
Chernossolo Argilúvico	2.251,90	1,52%
Gleissolo Sálíco	493,36	0,33%
Gleissolo Melânico	89,51	0,06%
Latossolo Amarelo	6.688,19	4,51%
Latossolo Vermelho	179,67	0,12%
Latossolo Vermelho-Amarelo	85,19	0,06%
Luvisolo Crômico	27.388,63	18,46%
Neossolo Regolítico	467,46	0,32%
Neossolo Litólico	28.835,73	19,44%
Neossolo Flúvico	2.379,38	1,60%
Neossolo Quartzarênico	9.354,21	6,31%
Nitossolo Vermelho	652,73	0,44%
Planossolo Háplico	16.098,26	10,85%
Planossolo Nátrico	798,15	0,54%
Vertissolo Ebânico	334,47	0,23%
Vertissolo Háplico	1.369,53	0,92%

Fonte: Elaborado pelo autor com dados de IBGE, 2021.

Os Argissolos predominam no estado, cobrindo 31,82% do estado, seguido pelos Neossolos (28,21%), Luvisolos (18,82%) e Planossolos (11,61%).

Figura 14 - Classes de solo do Ceará



Fonte: IPECE (2007).

3.2 Desenvolvimento do modelo inicial

O presente trabalho visou discutir, analisar e elucidar um problema complexo e relevante no âmbito da atuação dos órgãos ambientais, especialmente das equipes de fiscalização de campo. O problema envolve a determinação do valor da multa decorrente de infrações ambientais, em função da gravidade da infração ambiental e do potencial poluidor-

degradador (PPD) da atividade, através de uma abordagem matemática para calcular o valor da multa com base nos fatores citados.

O desenvolvimento do modelo inicial se alicerçou na aplicação de técnicas de análise diferencial para estruturar um modelo que possa calcular, de forma dinâmica e ajustada à realidade das variáveis envolvidas, o valor das multas lavradas em função de infrações ambientais.

Para resolução do problema proposto no presente trabalho, considerou-se a multa como uma variável M , tendo sido introduzidas duas outras variáveis, quais sejam g , que representa a gravidade da infração ambiental cometida com base nas características ambientais da área afetada, e p , que expressa o potencial poluidor-degradador da atividade desenvolvida pelo infrator. A interação dessas variáveis é modelada por meio de uma equação diferencial ordinária (EDO).

Dessa forma, se estabeleceu um problema de valor inicial, por meio de uma EDO de primeira ordem, expressa pela relação mostrada na Equação 16:

$$\frac{dM}{dg} = pM \quad (16)$$

Onde M denota o valor da multa associada a uma infração ambiental, g representa a gravidade da infração ambiental e p simboliza o potencial poluidor-degradador da atividade que gerou a conduta. A Equação 16 define uma classe de funções $M = M(g)$ que descrevem a variação do valor da multa em função da gravidade da conduta infracional.

A resolução da equação diferencial, sujeita à condição de contorno $M(0) = M_i$, corresponde ao valor inicial da multa.

Para obter a solução, empregou-se o método de separação de variáveis. Primeiramente, a Equação 16 foi reescrita em uma forma separável. Para isto, o primeiro passo adotado foi dividir ambos os lados da equação por M , resultando na Equação 17:

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dg} = p \quad (17)$$

Em seguida, ambos os lados da equação foram multiplicados por dg para separar as variáveis, resultando na Equação 18, uma forma da Equação 17 que é separável em M e g .

$$\frac{1}{M} dM = pdg \quad (18)$$

A partir da Equação 18, foi possível integrar ambos os lados da equação separadamente para obter a solução geral da EDO. Esse procedimento fornece a Equação 19:

$$\int \frac{1}{M} dM = \int p dg \quad (19)$$

que implica na Equação 20:

$$\ln|M| = pg + C \quad (20)$$

onde C denota a constante arbitrária de integração.

O passo seguinte foi isolar a variável M . Em ambos os lados da equação aplicou-se a função exponencial, inversa da função logaritmo natural, obtendo-se a Equação 21.

$$e^{(\ln|M|)} = e^{(pg+C)} \quad (21)$$

Em seguida, simplificou-se a Equação 21, obtendo-se a forma mostrada na Equação 22:

$$|M| = e^{(pg+C)} \quad (22)$$

Considerando que o valor obtido está em módulo e que M poderia ser potencialmente negativo, o que não se aplicaria no caso em tela, em razão de a multa não poder ser negativa, removeu-se o valor absoluto, resultando na Equação 23:

$$M = e^{(pg+C)} \quad (23)$$

Onde p e g são variáveis e C a constante de integração.

Para simplificar esta equação, o termo $e^{(pg+C)}$ foi reescrito como o produto de duas exponenciais. Neste caso, a constante de integração C aparece como o expoente de uma função exponencial. Como a soma dentro do expoente de uma função exponencial pode ser reescrita como o produto de duas funções exponenciais separadas, pode-se reescrevê-la usando a propriedade das exponenciais que define que $e^{(pg+C)} = e^{pg} * e^C$. Assim, a Equação 23 pode ser reescrita na forma da Equação 24:

$$M = e^C * e^{pg} \quad (24)$$

Considerando que e^C é uma constante, esta pode ser denotada como M_i , representando o ponto de partida da multa a ser aplicada, ou seja, o valor inicial da multa a ser lavrada. Portanto, a solução do problema de valor inicial é dada pela Equação 25:

$$M = M_i * e^{pg} \quad (25)$$

Onde M denota o valor da multa em função da gravidade g e do ppp p . O valor da multa M está sujeito a um crescimento exponencial em relação à gravidade da infração g , modulado pelo fator potencial poluidor-degradador p .

3.2.1 Variáveis do modelo proposto

3.2.1.1 Potencial Poluidor-Degradador - p

O Potencial Poluidor-Degradador (PPD) refere-se à capacidade intrínseca de uma atividade causar poluição ou degradação ambiental, e está relacionado aos aspectos ambientais de uma atividade considerada potencial ou efetivamente poluidora ou causadora de degradação ambiental.

Considerando que a Política Nacional do Meio Ambiente – PNMA (BRASIL, 1981) prevê “o licenciamento e a revisão de atividades efetiva ou potencialmente poluidoras”, além das “penalidades disciplinares ou compensatórias ao não cumprimento das medidas necessárias à preservação ou correção da degradação ambiental”, é nítida a importância do PPD como variável a ser considerada no processo de autuação ambiental pela Administração Pública.

Todos os entes federativos que atuam por meio de órgãos ambientais possuem em suas estruturas normativas dispositivos que classificam as atividades segundo o potencial de uma atividade causar poluição ou degradação ambiental.

Nesse sentido, no contexto da área geográfica objeto do presente trabalho, o Conselho Estadual do Meio Ambiente – Coema do estado do Ceará classifica o Potencial Poluidor-Degradador (PPD) em baixo, médio e alto (CEARÁ, 2019). Considerando ser o PPD uma entrada na Equação 25, foram atribuídos coeficientes, conforme Tabela 3:

Tabela 3 - Coeficientes de acordo com o PPD da atividade

PPD	VALOR
BAIXO	0,33
MÉDIO	0,67
ALTO	1,00

Fonte: Adaptado de Ceará (2019).

A atribuição dos coeficientes aos Potenciais Poluidor-Degradadores (PPD) baseou-se numa abordagem progressiva linear na escala de impacto, refletindo uma escala que representa o nível do PPD. A escala de 0,33 a 1,00 permite simplificar o processo de cálculo no modelo proposto, mantendo uma relação direta e proporcional entre os níveis de PPD, permitindo uma distinção clara entre seus diferentes níveis.

3.2.1.2 Gravidade da infração ambiental - g

A variável g da Equação 25 é o produto das variáveis $g_{máx}$ e g_{IGIA} . A *Gravidade máxima* ($g_{máx}$) é definida para cada infração tipificada, e está relacionada com o valor máximo que p e g poderão assumir, o que resultaria no valor máximo da multa ambiental $M_{máx}$ por meio de $p_{máx}$ e $g_{máx}$. Utilizando-se a Equação 25, procede-se o isolamento das variáveis $p_{máx}$ e $g_{máx}$. Primeiramente, efetua-se a divisão de ambos os lados da equação por M_i , resultando na Equação 26.

$$\frac{M_{máx}}{M_i} = \frac{M_i * e^{p_{máx}g_{máx}}}{M_i} \quad (26)$$

que implica na Equação 27:

$$\frac{M_{máx}}{M_i} = e^{p_{máx}g_{máx}} \quad (27)$$

Em seguida, para isolar $p_{máx}g_{máx}$, aplica-se a função logaritmo natural em ambos os lados, visando remover a função exponencial, resultando na Equação 28.

$$p_{máx}g_{máx} = \ln\left(\frac{M_{máx}}{M_i}\right) \quad (28)$$

Considerando que, conforme Tabela 3, o valor máximo que o ppd poderá assumir, neste caso, é igual a 1, pode-se reescrever a Equação 28 como na Equação 29.

$$g_{máx} = \ln\left(\frac{M_{máx}}{M_i}\right) \quad (29)$$

A $g_{máx}$ (Gravidade Máxima da Infração Ambiental - $g_{máx}$) representa o nível máximo que a gravidade da infração ambiental poderá assumir considerando os valores mínimos e máximos da multa ambiental prevista nos dispositivos legais.

Entretanto, é necessário que esse valor seja vinculado ao seu correspondente no ambiente cuja infração ocorreu. Para isto, foi estruturado o Índice de Gravidade da Infração Ambiental (IGIA), cujo valor individual da gravidade da infração ambiental é representado por g_{IGIA} que se refere ao valor do pixel numa determinada coordenada da imagem que representa o IGIA.

O Índice de Gravidade da Infração Ambiental (IGIA) foi desenvolvido a partir dos procedimentos adotados nas seções seguintes, mediante a proposição de um modelo espacial estruturado por meio de análise multicritério e sistemas de informações geográficas (SIG).

3.3 Seleção e avaliação dos critérios componentes do Índice de Gravidade da Infração Ambiental (IGIA)

Nesta seção foram propostos critérios de avaliação da gravidade da infração ambiental utilizando uma abordagem metodológica matemática híbrida, integrando os métodos *Fuzzy Delphi* (FDELPHI) e *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (FAHP). O método FDELPHI foi utilizado para selecionar os critérios componentes da gravidade da infração ambiental. O método FAHP foi aplicado para calcular os pesos relativos dos critérios selecionados que contribuem para a gravidade da infração ambiental.

De acordo com Stefano *et al.* (2017), o uso da abordagem FAHP resulta em algumas vantagens, tais como:

- i.* Os números *fuzzy* são preferíveis para entender o julgamento humano porque ele traz em si naturalmente a incerteza;
- ii.* A adoção de números *fuzzy* permite que os tomadores de decisão tenham a liberdade de estimar o que desejam;
- iii.* A abordagem lida bem com dados incertos porque os sentimentos humanos são imprevisíveis e incertos. Para modelar esse tipo de incerteza, o conjunto *fuzzy* pode ser incorporado na comparação pareada como uma extensão do processo de hierarquia analítica (AHP).

3.3.1 Seleção dos critérios

O problema a ser trabalhado é a estruturação de um índice para estimar a gravidade da infração ambiental com base em critérios componentes do ambiente onde ocorre o dano ambiental para subsidiar a lavratura de autos de infração em campo.

Para a seleção dos critérios utilizou-se o método *Fuzzy Delphi* (FDELPHI), que integra o método Delphi com a teoria *fuzzy* (MURRAY *et al.*, 1985), que apresenta a vantagem da simplicidade, e todas as opiniões de especialistas podem ser englobadas em uma única rodada, por meio respostas usando funções de grau de pertinência, como números difusos triangulares, números difusos trapezoidais, números difusos gaussianos etc. (OKOLI; PAWLOWSKI, 2004; HSU *et al.*, 2010; STEFANO, 2014; ZHANG, 2017; HASHEMINASAB, 2019; KANOKPHANVANICH; RATTANAWONG; VONGMANEE, 2023).

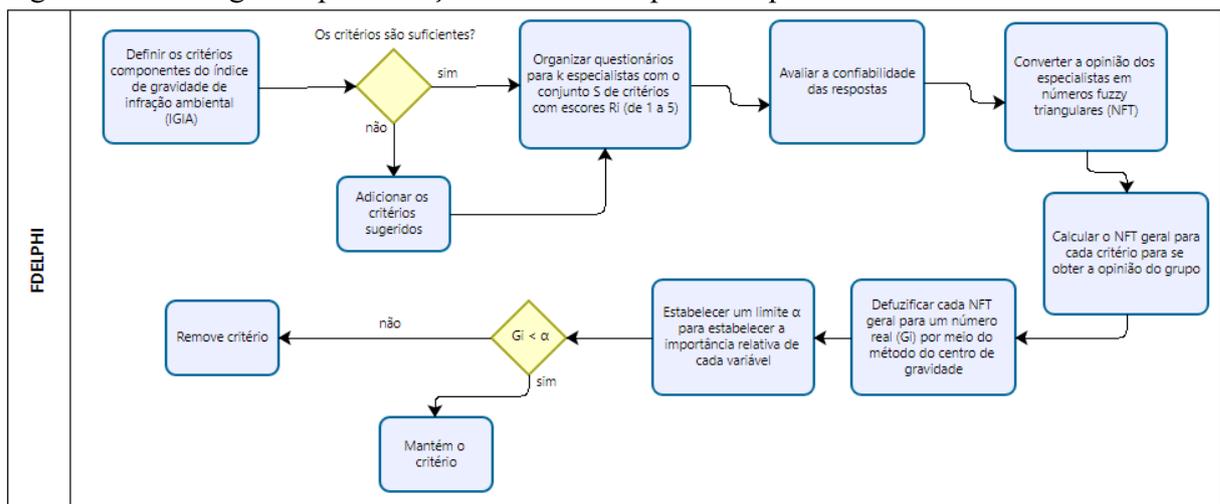
Os graus de pertinência das funções são usados para representar a opinião dos

especialistas, que ficam desobrigados a alterar as suas opiniões, como ocorre nas rodadas tradicionais do Delphi, além de as informações úteis não serem perdidas, em razão de a opinião de todos os especialistas ser respeitada e considerada no cálculo dos graus de pertinência (STEFANO, 2014).

A principal vantagem do Método FDELPHI para a coleta de decisão do grupo está no fato de que todas as opiniões de especialistas serão consideradas e integradas para alcançar o consenso das decisões do grupo. Além disso, reduz o tempo de análise e o custo (KUO; CHEN, 2008).

Assim, o processo de definição dos critérios pelos especialistas através da aplicação da Metodologia FDELPHI desenvolveu-se através das etapas mostradas na Figura 15, tomando-se como base os procedimentos apresentados em Kuo e Chen (2008), Hsu *et al.* (2010), Wang e Durugbo (2013) e Stefano *et al.* (2015).

Figura 15 - Fluxograma para seleção dos critérios para compor o IGIA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, procedeu-se a definição prévia de um rol de variáveis (Apêndice A), bem como a organização de um painel de especialistas e um questionário (Apêndice B), cujos resultados são mostrados no Apêndice C, para permitir que os especialistas expressem suas escolhas sobre a importância de cada critério na composição do IGIA, juntamente com um conjunto de critérios denominado S , em um intervalo de valoração de 1 a 5, conforme Tabela 4. A pontuação foi então definida como R_i , com $i \in S$, onde o índice do critério i é avaliado por k especialistas.

Tabela 4 - Escala de valoração dos critérios

Valor (R_i)	Descrição
1	Irrelevante
2	Pouco Importante
3	Importância Moderada
4	Importante
5	Muito Importante

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o passo adotado foi avaliar a confiabilidade do questionário respondido pelos especialistas. A confiabilidade é entendida como o grau em que o resultado medido reflete o resultado verdadeiro, ou seja, quanto uma medida está livre da variância dos erros aleatórios (HAYES, 1998 *apud* ALMEIDA; SANTOS; COSTA, 2010). Para isto, adotou-se o coeficiente alfa de Cronbach, uma das estatísticas mais importantes e difundidas em pesquisas envolvendo construção e uso de testes (CORTINA, 1993). De acordo com Leontitsis e Pagge (2007), o coeficiente alfa de Cronbach é estruturado de acordo com a Equação 30:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left[\frac{\sigma_r^2 - \sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_r^2} \right] \quad (30)$$

Onde σ_i^2 é a variância de cada coluna de uma matriz $n \times k$, e relaciona-se a cada pergunta feita, e σ_r^2 é a variância da soma de cada linha da matriz, sendo a variância da soma das respostas de cada respondente. O valor de k deve ser maior do que 1 para que não haja zero no denominador e n deve ser maior do que 1 para que não haja zero no denominador no cálculo de σ_i^2 e do σ_r^2 .

Na equação acima, k é um parâmetro de correção. Se houver consistência nas respostas quantificadas, então σ_r^2 será relativamente grande, o que levará α a tender para 1. Caso contrário, as respostas aleatórias farão com que σ_r^2 seja comparável com a soma das variâncias individuais (σ_i^2), o que por sua vez levará α a tender para 0 (LEONTITSIS; PAGGE, 2007).

O valor mínimo aceitável para o alfa é 0,70. Valores inferiores denotam consistência interna da escala utilizada considerada baixa. Por outro lado, o valor máximo esperado é 0,90, de forma que, acima deste valor, pode-se considerar que há redundância ou duplicação, ou seja, vários itens estão medindo exatamente o mesmo elemento de um constructo. Assim, os itens redundantes devem ser eliminados. Usualmente, são preferidos valores de alfa entre 0,80 e 0,90 (ALMEIDA; SANTOS; COSTA, 2010).

A etapa seguinte envolveu a organização das opiniões dos especialistas a partir do questionário e determinação dos números *fuzzy* triangulares (NFTs) $T_i = (L_i, M_i, U_i)$ para cada

critério i , conforme mostrado nas Equações 31 a 33:

$$L_i = \text{Min}(R_{ik}) \quad (31)$$

$$M_i = (R_{i1} \times R_{i2} \times R_{i3} \times \dots \times R_{ik})^{\frac{1}{k}} \quad (32)$$

$$U_i = \text{Max}(R_{ik}) \quad (33)$$

Onde, L_i indica o valor mínimo da classificação de todos os especialistas; M_i é a média geométrica da ponderação feita pelos especialistas em relação ao critério i ; e U_i indica a pontuação máxima atribuída pelos especialistas.

Os valores máximo e mínimo das opiniões de especialistas consideram os dois pontos terminais dos números *fuzzy* triangulares. A média geométrica é considerada o grau de pertinência dos números difusos triangulares para derivar um efeito estatisticamente imparcial e evitar o impacto de valores extremos. Este método permite melhorar o processo de seleção de critérios, apresentando a vantagem da simplicidade, bem como que todas as opiniões de especialistas sejam englobadas em uma única rodada (KUO; CHEN, 2008).

Após a determinação dos números *fuzzy* triangulares (NFTs), a terceira etapa consistiu na desfuzificação dos valores adotando-se a abordagem do centro de área (KAYACAN, 2016; HSIEH *et al.*, 2004) através da Equação 34:

$$G_i = \left[\frac{(u_i - l_i) + (m_i - l_i)}{3} \right] + l_i \quad (34)$$

O último passo do processo de seleção dos critérios consistiu em definir um limite α , de maneira que, se $G_i \leq \alpha$, então o critério i é eliminado. Para o presente trabalho adotou-se o valor de $\alpha = 3$, considerando que foram selecionados somente aqueles critérios definidos como importantes ou muito importantes pelos especialistas. Esta abordagem assegura que serão selecionados os critérios que possuem impacto significativo no objeto de estudo, focando nos aspectos mais críticos e influentes para o índice proposto.

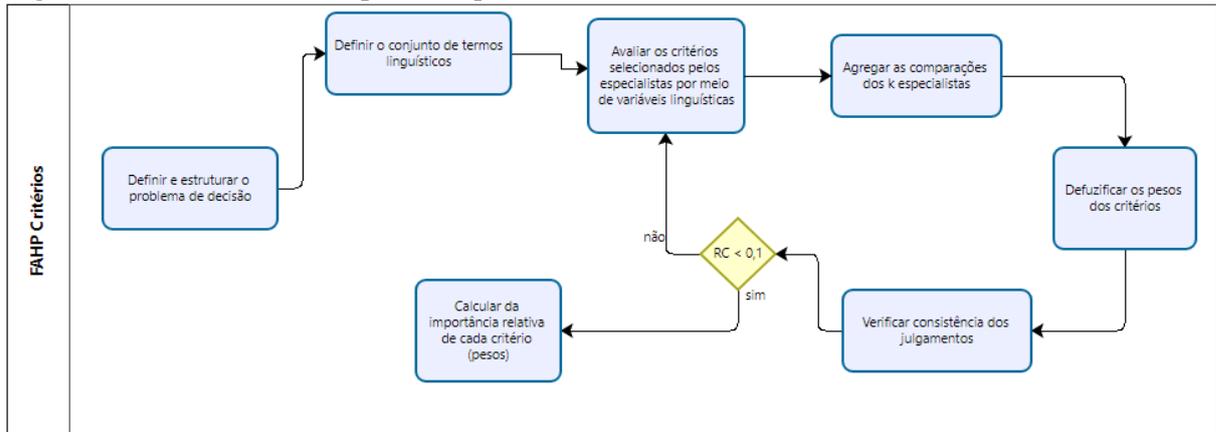
3.4 Cálculo dos pesos locais dos critérios

O método FAHP em termos de estrutura geral é similar ao método AHP. Entretanto, o AHP tem como limitação o fato de não fornecer uma abordagem do pensamento subjetivo (GUL; GUVEN; GUNERI, 2018). A vantagem do método FAHP reside na possibilidade de modelar esse tipo de incerteza por meio da incorporação dos conjuntos *fuzzy* na matriz de comparação pareada, funcionando como uma extensão do processo de análise hierárquica

(STEFANO, 2014). A Figura 16 mostra o fluxograma completo do processo de ranqueamento dos critérios por meio do método FAHP.

O processo de ranqueamento dos critérios selecionados envolve tanto ferramentas computacionais como a participação de especialistas ou grupo de especialistas, cujo papel é abordado nos tópicos seguintes.

Figura 16 – Procedimentos para ranqueamento dos critérios



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.4.1 Definição e estruturação do problema de decisão

Tomando-se como base a abordagem teórica de Saaty e Vargas (1982), assume-se que n critérios devem ser considerados antes de se tomar uma decisão. No desenvolvimento da hierarquia a ser aplicada no método FAHP, devem ser considerados três níveis de análise: o objetivo, os critérios e as alternativas.

O problema é estruturado de acordo com uma hierarquia, onde o elemento superior é o objetivo da decisão. O segundo nível da hierarquia representa os critérios e o nível mais baixo representa as alternativas. Em hierarquias mais complexas, mais níveis podem ser adicionados. Esses níveis adicionais representam os subcritérios. Em qualquer caso, existem no mínimo três níveis na hierarquia (ISHIZAKA; NEMERY, 2013).

O procedimento inicial para avaliação dos pesos dos critérios selecionados se dá por meio da construção de uma matriz de comparação pareada $\tilde{A} = [\tilde{a}_{ij}^k]_{n \times n}$, onde \tilde{a}_{ij}^k corresponde ao valor da comparação pareada entre os critérios c_{ij} na i -ésima linha e j -ésima coluna, dado pelo k -ésimo avaliador (Equação 35).

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \dots & \tilde{a}_{1j} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{i1} & \dots & \tilde{a}_{ij} & \dots & \tilde{a}_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \dots & \tilde{a}_{nj} & \dots & \tilde{a}_{nn} \end{bmatrix}_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\tilde{a}_{21}} & \dots & 1 & \dots & \tilde{a}_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\tilde{a}_{1n}} & \dots & \frac{1}{\tilde{a}_{2n}} & \dots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (35)$$

Onde, $c_{ij} \approx a_{ij}$, com $i, j = 1, \dots, n$; $c_{ii} = 1$, com $i, j = 1, \dots, n$; $a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$. Além disso, se c_i for em algum grau mais importante do que c_j , então $a_{ij} > 1$.

3.4.2 Definição de um conjunto de termos linguísticos

A escala triangular *fuzzy* de preferência utilizada neste estudo é apresentada na Tabela 5. A definição dos termos linguísticos e seus respectivos números *fuzzy* triangulares (NFTs) visam comparar os critérios com vistas a quantificar seu desempenho.

Tabela 5 - Variáveis linguísticas para comparação pareada de cada critério

Escala Linguística de Importância	Escala	Tipo de Escala
Igualmente Importante (II)	(1, 1, 1)	Escala Fuzzy Triangular
Levemente mais importante (LMI+)	(1, 3, 5)	
Mais importante (MI+)	(3, 5, 7)	
Muito mais importante (MMI+)	(5, 7, 9)	
Extremamente mais importante (EMI+)	(7, 9, 11)	
Levemente Menos importante (LMI-)	(1/5, 1/3, 1)	Escala Fuzzy Triangular Recíproca
Menos importante (MI-)	(1/7, 1/5, 1/3)	
Muito Menos importante (MMI-)	(1/9, 1/7, 1/5)	
Extremamente Menos importante (EMI-)	(1/11, 1/9, 1/7)	

Fonte: adaptado de Kannan *et al.* (2014); Abdullah (2017); Emrouznejad e Ho (2017).

3.4.3 Avaliação dos critérios e agregação das preferências dos k especialistas

A partir dos termos linguísticos adotados na Tabela 5 os especialistas avaliam os critérios selecionados. A agregação das preferências dos especialistas se deu através da média geométrica das opiniões calculada por meio das Equações 36 a 38 (ALYAMANI; LONG, 2020; ALYAMANI; LONG; NURUNNABI, 2021).

$$l_{ij}^k = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K l_{ij}^k} \quad (36)$$

$$m_{ij}^k = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K m_{ij}^k} \quad (37)$$

$$u_{ij}^k = \sqrt[k]{\prod_{k=1}^K u_{ij}^k} \quad (38)$$

Onde, l_{ij}^k , m_{ij}^k e u_{ij}^k representam os valores inferior, modal e superior, respectivamente, referentes ao especialista k , com número de critérios igual a K . Além disso, $l_{ij}^k \leq m_{ij}^k \leq u_{ij}^k$ e $l_{ij}, m_{ij}, u_{ij} \in [1/11, 11]$.

3.4.4 Desfuzificação dos pesos fuzzy

Esta etapa engloba o processo de desfuzificação, que consiste na obtenção de um único número da saída do conjunto *fuzzy* agregado pelo grau de valores de pertinência, aplicado sobre a matriz agregada.

A desfuzificação é uma transformação inversa em relação ao processo de fuzzificação, pois neste processo, a saída *fuzzy* é convertida em valores *crisp* para serem aplicados ao sistema.

Um dos métodos mais utilizados é o método do centro de área que toma o centro de gravidade do conjunto *fuzzy* (KAYACAN, 2016; HSIEH *et al.*, 2004), resultando na obtenção da melhor prioridade não *fuzzy* de importância dos critérios (ALYAMANI, 2020; 2021). Esses valores são então usados para classificar a importância dos critérios que comporão o índice. O cálculo do peso w_{ij} é mostrado na Equação 39 (KAR, 2014; KAR, 2015):

$$w_{ij} = \frac{l_{ij} + 2 \times m_{ij} + u_{ij}}{4} \quad (39)$$

3.4.5 Verificação de consistência

A verificação de consistência dos valores de julgamentos coletados foi conduzida nos mesmos termos adotados no método AHP tradicional, segundo o qual julgamentos consistentes devem satisfazer à condição $CR < 0,1$, sendo calculado por meio da Equação 40 (Saaty, 1980).

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{RI(n - 1)} \quad (40)$$

Onde, IC = Índice de Consistência; $n = n^\circ$ de critérios da matriz; $\lambda_{m\acute{a}x}$ = autovalor principal da matriz de julgamentos; RI = índice randômico baseado no tamanho da matriz n , conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Índice médio de consistência randômica (RI)

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Índice de Consistência Randômica (RI)	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40	1,45	1,49

Fonte: Saaty e Vargas (2012).

3.4.6 Definição dos pesos relativos dos critérios

Após a verificação de consistência, procedeu-se o cálculo dos pesos w_i por meio da importância relativa por meio da média geométrica normalizada da matriz desfuzificada, conforme Equação 41:

$$w_i = \left(\prod_{i=1}^n w_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (41)$$

Onde, w_i é o peso do critério após o cálculo da média geométrica; w_{ij} é o peso relativo do i -ésimo critério em relação ao j -ésimo critério.

3.4.7 Normalização dos pesos dos critérios

Após o cálculo dos pesos dos critérios, procedeu-se a normalização dos valores de forma que estes variassem de 0 a 1. Para isto, utilizou-se a Equação 42:

$$w_k = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (42)$$

Onde, w_k é o peso normalizado do critério k ; $\sum_{j=1}^n w_j$ representa a soma dos valores dos pesos w_i na coluna j .

3.5 Normalização dos critérios

Considerando que no presente trabalho foram utilizados vários critérios no processo de avaliação multicriterial, a combinação desses critérios fica comprometida se estes estiverem estruturados em escalas diferentes de valores. Diante disso, antes da combinação dos critérios, a solução para esta questão é a padronização para que todos os critérios gerem mapas padronizados de maneira que possam ser comparados *pixel a pixel*.

Nesta etapa, os critérios selecionados foram gerados e, a partir deles, trabalhou-se a sua normalização, método baseado em Sistemas de Informação Geográfica mais popular para padronização de critérios de avaliação (Malczewski e Rinner, 2015). Além dos métodos descritos nas equações 2 e 3, que representam funções lineares, também foi utilizada a abordagem proposta por ESRI (2008), por meio das funções de associação *Fuzzy Membership Large* (Equação 43), para critérios de maximização, e *Fuzzy Membership Small* (Equação 44), para critérios de minimização.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{mp}\right)^{-sp}} \quad (43)$$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x}{mp}\right)^{sp}} \quad (44)$$

Onde, x é o valor referente à medida do parâmetro analisado; mp corresponde ao ponto médio e o sp ao espalhamento, cujo valor padrão é 5. Quanto maior o espalhamento, mais inclinada será a curva de associação *fuzzy* (ESRI, 2008).

A função *Large* é útil quando os valores maiores dos dados possuem uma associação mais alta. A função *Small*, por sua vez, é útil quando os valores menores têm uma associação mais alta (ESRI, 2008). As referidas abordagens são úteis quando se deseja evitar valores de associação exatamente iguais a zero, mantendo-se uma associação positiva, por menor que seja, para todos os valores de entrada.

As funções de pertinência para os critérios utilizados foram implementadas por meio do processamento no *software RStudio*, tendo sido criada uma função para cada tipo de critério. Os arquivos gerados no formato matricial foram então importados para o ambiente SIG por meio do *software QGIS* versão 3.22-Białowieża.

3.6 Estruturação do Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA

Esta etapa consiste na agregação do produto dos pesos dos subcritérios pelos pesos dos critérios a que pertencem, ambos variando entre 0 e 1. Os critérios consistem nas variáveis utilizadas que por sua vez são compostas por subcritérios que assumem valores contínuos.

A estruturação do Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA ocorreu mediante a aplicação do método da Combinação Linear Ponderada - CLP pelo qual os critérios e subcritérios são padronizados em uma escala numérica comum e, então, combinados através da aplicação de pesos a cada um deles, seguido pela somatória destes resultados, conforme mostrado na Equação 45.

$$IGIA = \sum_0^1 w_k \times v(a_{ik}) \quad (45)$$

Onde IGIA corresponde ao Índice de Gravidade da Infração Ambiental, que varia de 0 a 1; w_k é o peso local do k -ésimo critério/atributo; $v(a_{ik})$ é o valor da i -ésima alternativa normalizada do k -ésimo atributo, representado pelos geocampos resultantes dos processos executados na etapa 3.5.

O IGIA corresponde a um geocampo síntese da combinação dos sete critérios selecionados para compor o referido índice. Cada pixel da imagem que representa um critério/atributo refere-se ao peso da alternativa de solução ou o valor de g_{IGIA} .

3.7 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é utilizada com vistas a se obter uma medida da robustez dos resultados. A principal fonte de incerteza na análise multicritério espacial (AMCE) surge dos critérios selecionados e dos pesos definidos (MALCZEWSKI, 1999). Existem diversas metodologias para análise de sensibilidade em AMCE descritas na literatura usadas avaliar a estabilidade dos pesos atribuídos por especialistas (MALCZEWSKI, 1999; SHABAN *et al.*, 2006; RAHMAN *et al.*, 2012; XU; ZHANG, 2013; MALCZEWSKI; RINNER, 2016; VALVERDE *et al.*, 2016; GIGOVIC *et al.*, 2016; MORADI *et al.*, 2020; KWAK; DEAL; HEAVISIDES, 2021).

Uma das principais abordagens é a reatribuição de valores de critério (SHANKAR; MOHAN, 2005), por meio do método de análise de sensibilidade OAT (*once-at-a-time*), utilizado para entender o impacto de parâmetros individuais em um sistema ou modelo ao variar

o valor de um parâmetro de cada vez, mantendo os outros parâmetros constantes, possibilitando avaliar o quão sensíveis são os resultados às mudanças nesse parâmetro específico. Neste trabalho, foi utilizada a abordagem descrita em Chen, Yu e Khan (2010), Çetinkaya *et al.* (2016) e Alkan e Kahraman (2022), por meio da alteração dos pesos dos critérios e o reflexo nos correspondentes geocampos resultantes da agregação dos critérios.

Com isto, foi possível validar o modelo proposto e a robustez da técnica aplicada, permitindo testar a consistência do modelo utilizado por meio análise dos impactos da modificação dos pesos dos critérios/atributos no Índice de Gravidade da Infração Ambiental (IGIA).

Assim, para avaliar a sensibilidade, o peso w_k foi submetido a uma variação percentual (vp), por meio da Equação 46:

$$w_k = w_{k0} \pm w_{k0} \times vp \quad (46)$$

Onde, w_{k0} é o peso do k -ésimo critério com a maior importância no modelo de referência, aquele estimado por meio dos pesos originais; vp é a variação percentual a que o peso será submetido.

Os pesos dos demais critérios w_j são proporcionalmente ajustados de acordo com a Equação 47:

$$w_j = (1 - w_k) \times \frac{w_{j0}}{(1 - w_{j0})} \quad (47)$$

Onde, w_j é o novo valor do peso atribuído ao j -ésimo critério e w_k é o peso do k -ésimo critério num certo nível de variação percentual. w_{k0} e w_{j0} são os valores dos pesos dos critérios k e j no modelo de referência.

Foram realizadas oito simulações a partir do peso de referência e suas alterações nos seguintes percentuais $\pm 5\%$, $\pm 10\%$, $\pm 15\%$ e $\pm 20\%$. Dessa forma, foram criados e analisados nove arquivos no formato *raster* referentes ao IGIA, sendo um com pesos originais e oito com os pesos ajustados.

4 RESULTADOS OBTIDOS

4.1 Seleção dos critérios com base no método Fuzzy-Delphi

Para selecionar os critérios que comporão o Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA utilizou-se o método *Fuzzy Delphi*. Primeiramente foi realizado um painel com especialistas na área ambiental, em cuja oportunidade foram relacionados os possíveis critérios a serem utilizados no presente estudo, a partir de uma lista pré-definida de critérios levantados da literatura relacionada. O objetivo foi estabelecer uma lista de critérios de avaliação que representasse o consenso entre os especialistas consultados quanto à composição do referido índice. Vale ressaltar que, considerando a escassez de bibliografia abordando a temática da gravidade da infração ambiental, os critérios elencados basearam-se em trabalhos desenvolvidos e relacionados à temática ambiental, tais como degradação ambiental, vulnerabilidade/fragilidade ambiental, modelagem dinâmica de uso e cobertura da terra e seleção de áreas, que levam em conta critérios ambientais.

Para isto, foi acessada a base de dados *Web of Science*, cuja busca ocorreu por meio de três palavras-chave: “*environment*” “*geographic information system*” e “*fuzzy analytic hierarchy process FAHP*”.

A palavra-chave “*environment*” serviu para delimitar o tipo de critério objeto da busca. Os critérios ambientais então devem ser espacializáveis, razão pela qual utilizou o termo “*geographic information system*” e, por fim, delimitou-se o método por meio do termo “*fuzzy analytic hierarchy process FAHP*”. Foram selecionados os 25 artigos mais citados, nos quais foram extraídos 71 critérios, cuja lista e bibliografia consultada constam do Apêndice A.

Após a seleção dos critérios, foi organizado um painel com servidores do órgão ambiental estadual do Ceará, a Superintendência Estadual do Meio Ambiente – Semace, da carreira de Gestão Ambiental, com vistas a avaliar se a lista de critérios elencados poderia ter uma primeira redução em seu número, formado por servidores ocupantes do cargo de Fiscal Ambiental, com as seguintes formações Geografia (02), Biologia (01), Agronomia (01), Engenharia Química (01), Engenharia Civil (01), Direito (01), Sociologia (01), totalizando oito servidores.

Foram excluídos 36 critérios por terem sido considerados sem relação com a infração ambiental. São eles: Aceitação Social; Água Subterrânea; Área da Bacia; Área Geográfica; Área Histórica; Concentração de PM10; Curvatura; Densidade de lineamentos; Direção do vento; Distância de Aeroportos; Distância de Falhas Geológicas; Distância de

Linhas de Transmissão de Energia; Distância de Poços; Hidrogeologia; Índice de Circularidade; Índice de Convergência; Índice de Poder de Fluxo; Índice de Posição Topográfica; Índice de Rugosidade do Terreno; Índice de Transporte de Sedimentos; Índice de Umidade Topográfica; Irradiação solar; Irradiância Horizontal Global; Irradiância Normal Direta; Material do Leito Rochoso; Média Anual de Dias Nublados; Orientação do Terreno; Potencial de captação de água da chuva; Pressão atmosférica; Profundidade do Escoamento; Profundidade do Lençol Freático; Radiação solar; Rugosidade do Terreno; Taxa de Incidência de Raios; Umidade do Ar; Velocidade do vento.

Dos 35 critérios restantes, o critério *Poluição Sonora* foi excluído por se tratar de um tipo de infração. Outros 19 critérios foram excluídos por terem sido considerados como relacionados a outros critérios. São eles: Comprimento Médio de Cursos D'água de Primeira Ordem e Rede de Drenagem por estarem relacionados com o critério Distância de Recursos Hídricos; Densidade da Rede Viária por estar relacionado com o critério Distância de Vias; Litologia por estar relacionado com o critério Geologia; Gradiente Médio da Bacia por estar relacionado com o critério Geomorfologia; Área Edificada, Área Líquida Semeada, Cobertura Florestal, Distância de Áreas Industriais, Infraestrutura, NDMI – Índice de Umidade da Vegetação, NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada, Número de Distritos, População, Risco à saúde, Terra sob cultivo de árvores variadas e bosques não incluídos na área semeada líquida, Terras em Pousio, Textura do solo e Curve Number – CN, por estarem relacionados com o critério Uso e Cobertura da Terra.

Foram selecionados 15 critérios, sendo eles: Clima; Declividade; Densidade de Drenagem; Distância de Áreas Protegidas; Distância de Núcleos Urbanos; Distância de Recursos Hídricos; Distância de Vias; Elevação/Altitude; Geologia; Geomorfologia; Pluviosidade; Solos; Temperatura da Superfície Terrestre; Temperatura do Ar; Uso e Cobertura da Terra. Além disso, foi sugerida a inserção de outros 6 critérios que, segundo os especialistas consultados, relacionam-se com a infração ambiental: Densidade de Focos de Queimada; Densidade de Residências; Densidade Demográfica; IDH; Índice de Aridez; Vegetação.

Dessa forma, após a triagem inicial, foram selecionados para a fase seguinte 21 critérios, conforme listados a seguir: Clima; Declividade; Densidade de Drenagem; Distância de Áreas Protegidas; Distância de Núcleos Urbanos; Distância de Recursos Hídricos; Distância de Vias; Elevação/Altitude; Geologia; Geomorfologia; Pluviosidade; Solos; Temperatura da Superfície Terrestre; Temperatura do Ar; Uso e Cobertura da Terra; Densidade de Focos de Queimada; Densidade de Residências; Densidade Demográfica; IDH; Índice de Aridez; Vegetação.

Selecionados os critérios, estes foram avaliados seguindo a proposta de ponderação indicada na Tabela 4. Foram contactados via ferramentas *on line*, por meio de envio de *link* de formulário eletrônico (Apêndice B), 80 profissionais, dos quais 36 participaram da pesquisa contribuindo com respostas ao questionário, e cujo perfil profissional é apresentado no Quadro 4.

O Alpha de Cronbach calculado para o conjunto de respostas fornecidas foi de aproximadamente 0,826, valor que indica uma boa consistência interna entre as variáveis, sugerindo que os itens do questionário são relativamente coesos na medição do construto "Índice de Gravidade da Infração Ambiental", indicando que os itens estão adequadamente relacionados entre si para formar uma escala confiável.

Quadro 4 - Perfil dos especialistas consultados

Ator de Decisão	Instituição	UF	Qtde
Órgão Ambiental	Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Controle Urbano de Itaitinga - SEMAM	CE	1
	Agência Municipal de Meio Ambiente – AMA (Sobral)	CE	1
	Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE	CE	18
	Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos - INEMA	BA	1
	Instituto de Desenvolvimento Sustentável e Meio Ambiente – IDEMA	RN	1
Consultoria Ambiental	Consultor Ambiental	CE	7
Pesquisador na área ambiental	Universidade Federal do Ceará – UFC	CE	4
	Universidade de Fortaleza – UNIFOR	CE	1
	Universidade de São Paulo – USP	SP	1
	Universidade Estadual Paulista - UNESP	SP	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados das avaliações pelos especialistas consultados são mostrados na Tabela 7, que lista os critérios com seus respectivos valores de média geométrica, máximo, mínimo e o valor de G_i . Os valores em vermelho referem-se aos critérios que não atingiram a pontuação mínima para serem selecionados.

Tabela 7 - Seleção e avaliação dos critérios através do método FDELPHI

Critério	Média Geométrica (M _i)	Máx (U _i)	Mín (L _i)	G _i
Vegetação	4,36	5,00	2,00	3,79
Declividade	4,15	5,00	2,00	3,78
Geomorfologia	4,28	5,00	2,00	3,76
Uso e Cobertura da Terra	4,22	5,00	2,00	3,74
Distância de Recursos Hídricos	4,04	5,00	2,00	3,68
Solos	3,77	5,00	1,00	3,26
Clima	3,71	5,00	1,00	3,24
Geologia	3,28	5,00	1,00	3,09
Distância de Vias	3,04	5,00	1,00	3,01
Altitude	3,02	5,00	1,00	3,00
Pluviosidade	2,99	5,00	1,00	3,00

continua

Temperatura do Ar	3,02	5,00	1,00	3,00
Temperatura da Superfície	2,99	5,00	1,00	3,00
Densidade demográfica	2,99	5,00	1,00	3,00
Densidade de Drenagem	2,97	5,00	1,00	2,99
Índice de Aridez	2,97	5,00	1,00	2,99
Distância de Núcleos Urbanos	2,96	5,00	1,00	2,99
Densidade de Focos de Queimada	2,97	5,00	1,00	2,99
Densidade de Residências	2,93	5,00	1,00	2,98
Distância de Áreas Protegidas	2,93	5,00	1,00	2,98
Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)	2,54	5,00	1,00	2,85

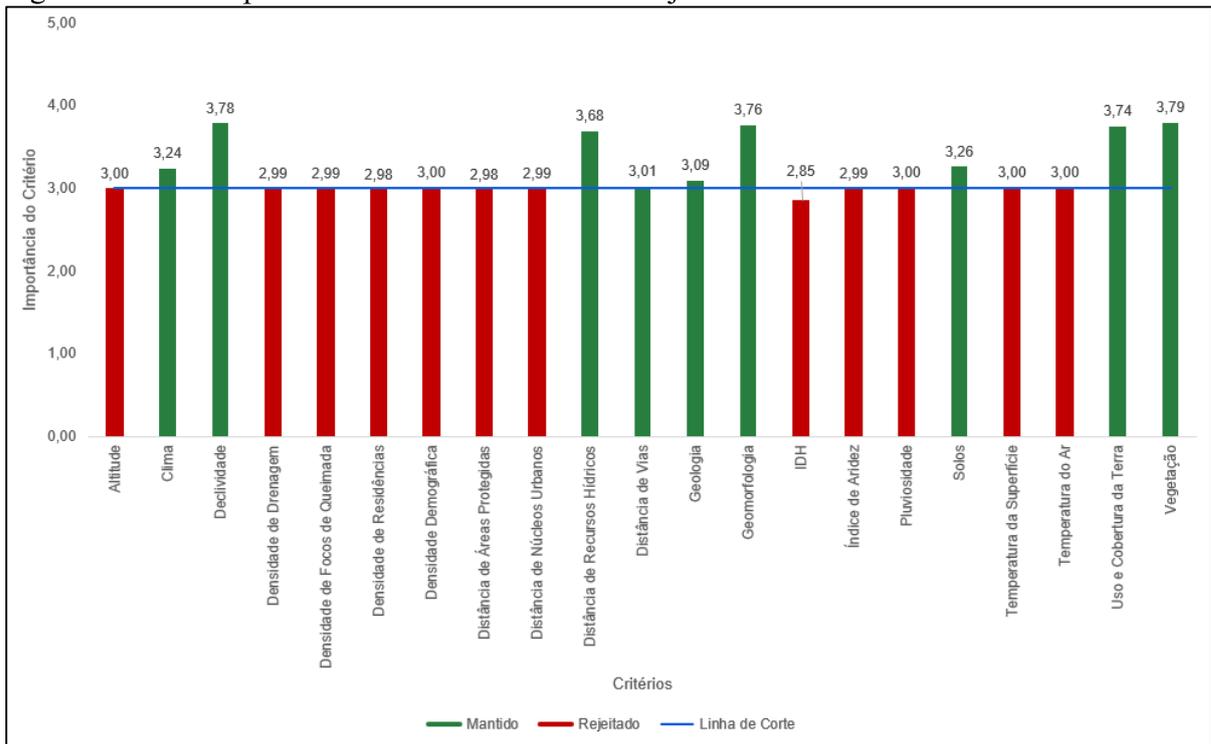
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dessa forma, foram rejeitados os seguintes critérios: Altitude, Pluviosidade, Temperatura do Ar, Temperatura da Superfície, Densidade Demográfica, Densidade de Drenagem, Índice de Aridez, Distância de Núcleos Urbanos, Densidade de Focos de Queimada, Densidade de Residências, Distância de Áreas Protegidas e Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) por apresentarem valor de G_i menor do que 3. O gráfico da Figura 17 mostra o desempenho dos critérios mantidos e rejeitados.

Por fim, foram mantidos os seguintes critérios para compor o índice proposto: Clima, Declividade, Distância de Recursos Hídricos, Distância de Vias, Geologia, Geomorfologia, Solos, Uso e Cobertura da Terra e Vegetação. O formulário completo com as ponderações dos especialistas consta no Apêndice C.

No contexto dos critérios mantidos, verificou-se que as variáveis Vegetação e Uso e Cobertura da Terra possuíam relação direta, estando a vegetação incluída nas categorias de cobertura da terra, razão pela qual optou-se por incorporá-la à variável Uso e Cobertura da Terra. O critério Geomorfologia foi representado pela Declividade. Por fim, a despeito da rejeição do critério Pluviosidade, este foi utilizado para compor o critério Clima, já que ambos se relacionam diretamente.

Figura 17 - Desempenho dos critérios mantidos e rejeitados



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 Cálculo dos pesos locais dos critérios

Após aplicação dos questionários, definição dos critérios selecionados para composição do índice, foi organizado um modelo hierárquico visando a avaliação dos critérios por meio da aplicação do método *FAHP*. O objetivo desta etapa foi proceder o ranqueamento dos critérios de acordo com a importância para o índice proposto. Para isto, foram encaminhados 36 questionários para os profissionais consultados, tendo sido obtidas as avaliações de 12 sobre os critérios.

A avaliação foi feita de acordo com o questionário acostado ao Apêndice D, a partir das variáveis linguísticas propostas na Tabela 5. Assim, os especialistas utilizaram as variáveis linguísticas para avaliar os critérios conforme suas percepções enquanto variáveis componentes do índice, o que foi devidamente explicitado na condição de objetivo do trabalho, ou seja, os especialistas foram orientados a ponderar os critérios visando atingir o objetivo principal, qual seja a estruturação do índice.

É importante que isto fique claro para o avaliador, já que a sua formação, experiência profissional ou acadêmica prévia influenciarão na sua resposta. Portanto, se o objetivo não ficar claro para o avaliador, ou seja, a direção que o mesmo deve seguir, as respostas se darão em descompasso com o objetivo proposto.

Tabela 8 - Valores linguísticos atribuídos aos critérios pelo especialista 1

CRITÉRIO	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI-	LMI-	LMI-	MI-	MI-	EMI-
USCO	MI+	II	MI+	MMI+	MI+	MI+	II
GEOL	LMI+	MI-	II	II	MI-	MMI-	MI-
PEDO	LMI+	MMI-	II	II	LMI-	MI-	MI-
DECL	MI+	MI-	MI+	LMI+	II	MI-	LMI-
DVIAS	MI+	MI-	MMI+	MI+	MI+	II	MI-
DIRH	EMI+	II	MI+	MI+	LMI+	MI+	II

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9 - Valores linguísticos atribuídos aos critérios pelo especialista 1 convertidos em NFTs

CRITÉRIO	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	1	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1/7
USCO	3	5	7	1	3	5	7
GEOL	1	3	5	1	1	1/7	1/5
PEDO	3	5	1/9	1/7	1/5	1/3	1
DECL	3	5	7	1/5	1/3	1	1/7
DVIAS	3	5	7	9	3	5	7
DIRH	7	9	11	1	1	3	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 - Matriz agregada fuzzy das opiniões dos especialistas

CRITÉRIO	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	1,00	0,62	0,88	1,36	0,70	1,40	2,84
USCO	0,74	1,14	1,00	1,00	1,95	3,20	4,79
GEOL	0,35	0,71	1,42	0,21	0,31	0,51	1,00
PEDO	0,61	0,99	1,51	0,17	0,25	0,47	0,64
DECL	0,87	1,25	1,91	0,23	0,34	0,60	1,21
DVIAS	0,87	1,38	2,27	0,32	0,43	0,69	1,24
DIRH	1,21	1,61	2,17	0,49	0,62	0,89	1,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os critérios foram organizados na forma de siglas descritas no Quadro 5:

Quadro 5 - Critério e siglas utilizados no trabalho

Critério	Sigla
Clima	CLIM
Uso e Cobertura da Terra	USCO
Geologia	GEOL
Pedologia	PEDO
Declividade	DECL
Distância de Vias	DVIAS
Distância de Recursos Hídricos	DIRH

Fonte: Elaborado pelo autor.

Recebidas as respostas aos questionários contendo as matrizes de comparação pareada, o primeiro passo adotado nos procedimentos foi elencar os julgamentos realizados por meio dos valores linguísticos, conforme disposto na Tabela 8, que se refere às opiniões do especialista 1.

Em seguida, os valores linguísticos foram convertidos em NFTs, de acordo com a Tabela 9. As demais tabelas estão apresentadas no Apêndice E (valores linguísticos) e Apêndice F (conversão em NFTs).

O passo seguinte foi a agregação das preferências dos 12 especialistas através da média geométrica das opiniões utilizando as equações 36 a 38, representadas na Tabela 10, cujos valores foram convertidos em valores *crisp*, por meio da Equação 39, mostrado na Tabela 11.

Em seguida, realizou-se a verificação de consistência dos valores de julgamentos coletados, conduzida nos mesmos termos adotados no método AHP tradicional, segundo o qual julgamentos consistentes devem satisfazer à condição $CR < 0,1$, sendo calculado por meio da Equação 40 sobre os dados da Tabela 11.

Tabela 11 - Matriz de agregada *fuzzy* de pesos dos critérios convertido em *crisp values*

-	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	1,000	0,934	1,587	1,078	0,816	0,758	0,632
USCO	1,155	1,000	3,286	4,007	2,959	2,303	1,603
GEOL	0,800	0,336	1,000	1,158	0,539	0,496	0,615
PEDO	1,026	0,286	0,903	1,000	1,058	1,220	0,682
DECL	1,323	0,378	2,072	1,118	1,000	1,729	1,472
DVIAS	1,477	0,469	2,305	0,919	0,672	1,000	0,479
DIRH	1,652	0,653	1,810	1,642	0,831	2,290	1,000

Fonte: Elaborado pelo autor.

O procedimento adotado foi a obtenção das médias geométricas das linhas da matriz resultante (Tabela 11), procedimento sugerido por Saaty (1987), obtendo-se o autovetor W . Este procedimento gerou uma nova coluna na matriz, que foi normalizada, obtendo-se o autovetor w normalizado. Em seguida foi executado o produto vetorial Aw que consiste no produto das linhas da matriz pela coluna do autovetor normalizado.

Posteriormente, procedeu-se a divisão do produto vetorial de cada linha pelo autovetor de cada linha, resultando no λ (Lambda) de cada linha. Em seguida, foi estabelecido o $\lambda_{máx}$, que consiste na média da coluna que contém os valores λ individuais. Depois disso, por meio da Equação 40, obteve-se o Índice de Consistência Aleatório (CR) que deve ser menor do que 0,1. Para a presente análise, obteve-se um CR de 0,08, o que permite afirmar que a matriz de julgamento é consistente, permitindo o avanço para o passo seguinte, que se refere aos pesos relativos dos critérios. A partir dos cálculos efetuados, obteve-se o vetor W de pesos dos critérios que, após normalizado, resultou no vetor normalizado w :

$$W = (0.935, 2.076, 0.654, 0.812, 1.167, 0.898, 1.295)$$

$$w = (0.119, 0.265, 0.083, 0.104, 0.149, 0.115, 0.165)$$

Tabela 12 - Critérios e pesos normalizados em ordem de importância

Sigla	Critério	Peso
USCO	Uso e Cobertura da Terra	0,265
DIRH	Distância de Recursos Hídricos	0,165
DECL	Declividade	0,149
CLIM	Clima	0,119
DVIAS	Distância de Vias	0,115
PEDO	Pedologia	0,104
GEOL	Geologia	0,083
Total		1,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme verifica-se na Tabela 12, o critério Uso e Cobertura da Terra obteve importância igual a 0,265, figurando como o critério que mais contribui para a gravidade da infração ambiental. Isso pode ser verificado quando se analisa a maioria das infrações descritas na norma que trata das multas ambientais que relaciona as infrações aos usos os quais o ambiente é submetido, como por exemplo, supressão de vegetação, mineração, construção, reforma e ampliação de empreendimentos, lançamento de efluentes e resíduos sólidos no ambiente, dentre outras práticas que, quando não autorizadas pelos órgãos competentes, podem resultar no comprometimento do controle ambiental dessas atividades causadoras de degradação ambiental. De acordo com Torres (2011), as ações antrópicas têm causado

mudanças ambientais em dimensões cada vez maiores, gerando relevantes impactos sobre a biosfera, sendo as mais significativas as mudanças no uso e cobertura da terra que, segundo Silva (2011), podem resultar na redução da cobertura vegetal, o aumento de processos erosivos e de áreas impermeabilizadas, com decorrente contaminação dos cursos d'água.

O critério Distância de Recursos Hídricos obteve peso de 0,165. O desmatamento das margens de recursos hídricos compromete as funções de proteção que a vegetação exerce, aumento do escoamento superficial, assoreamento e poluição dos recursos hídricos, comprometendo as funções de preservação dos recursos hídricos, do solo, impactando no bem-estar das populações humanas.

O critério Declividade apresentou importância de 0,149. A declividade do terreno contribui para o escoamento da água de maneira que, quanto maior for o comprimento da vertente, maior será o escoamento superficial, e maior será o potencial de erosão. As atividades antrópicas contribuem para acelerar o processo de erosão em áreas com declividade acentuada (Mota, 1981). Nesse contexto, a declividade desempenha um importante papel na composição do índice proposto, na medida em que problemas ambientais em áreas com declividades acentuadas potencialmente geram maiores danos ambientais. Este critério está relacionado às formas do relevo, que podem tornar uma região mais ou menos vulnerável à ocorrência de processos erosivos, a depender da forma de manejo que ocorra na área.

O critério Clima obteve importância na ordem de 0,119. O clima influencia diretamente o intemperismo, através da precipitação pluviométrica e da temperatura de uma região, e de forma indireta por meio dos tipos de vegetação que poderão cobrir a paisagem (Crepani *et al.*, 2001). A interação da chuva com o solo pode gerar processos erosivos a depender da capacidade do solo em resistir à erosão, o que se relacionará com a sua cobertura. De acordo com Lima *et al.* (2000), no Ceará, as chuvas ocorrem durante os meses de fevereiro a maio, que compreendem o período entre o verão e o outono, ocorrendo chuvas mais intensas. No entanto, também são notados episódios de secas intensas que podem persistir por um ou mais anos. Nestas situações, as chuvas são altamente irregulares e apresentam uma característica de incerteza, resultando em condições de seca.

O critério Distância de Vias obteve peso de 0,115. Diversos estudos têm abordado a relação entre a abertura de estradas e desmatamento, como o estudo de Barber *et al.* (2014) que mostrou que o desmatamento é maior próximo a estradas e rios.

O critério Pedologia apresentou peso de 0,104. O solo representa um recurso vital para a sustentação da vida, sendo um recurso limitado e requerendo um entendimento aprofundado para sua conservação e proteção da degradação. Além disso, os tipos de solos

condicionam os tipos de usos neles desenvolvidos, como por exemplo atividades agrícolas que podem comprometer a sua qualidade.

Por fim, o critério Geologia obteve peso de 0,083, ocupando a última posição em importância. Porém contribui de maneira importante para o índice proposto, “uma vez que em rochas pouco coesas prevalecem os processos modificadores das formas de relevo (morfogênese), enquanto nas rochas bastante coesas prevalecem os processos de formação de solos (pedogênese)” (CREPANI *et al*, 2001, p. 14).

Dessa forma, a análise integrada dos critérios selecionados permite a adequada estruturação do Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA, na medida em que será possível, com base nas próprias características do ambiente e em critérios de distância, estabelecer em quais áreas uma determinada infração ambiental terá uma significância maior em termos de degradação ambiental, permitindo a estimação da multa a ser lavrada com base nas características do local onde ocorreu a infração, fornecendo critérios técnicos e objetivos para, de forma proporcional e razoável, definir a sanção aplicada de forma adequada às regras impostas pela legislação aplicável.

Nesse contexto, selecionados e ponderados os critérios que compõem o Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA, procedeu-se a normalização dos critérios visando a compatibilização entre eles, por meio das equações apresentadas na seção 3.5. Assim, a partir dos dados brutos gerados para cada critério, em unidades diferentes, procedeu-se a compatibilização numa única escala variando de 0 a 1. Os mapas resultantes dos procedimentos adotados para a padronização dos critérios estão representados no Apêndice G.

4.3 Normalização dos critérios

4.3.1 Clima (Intensidade Pluviométrica)

A intensidade pluviométrica é especialmente importante em áreas semiáridas, onde ocorre uma precipitação anual mais reduzida, mas que ocorre torrencialmente em um período determinado do ano, podendo causar uma extensiva denudação (CREPANI *et al.*, 2001).

O estudo climático ocorreu mediante o cálculo da intensidade pluviométrica e teve início com a obtenção dos dados de precipitação adquiridos do Projeto de Previsão de Recursos Energéticos Mundiais (POWER) da Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA) *Langley Research Center (LaRC)*, financiado pelo Programa de Ciências da Terra/Ciências Aplicadas da NASA, cujos valores adquiridos foram então atribuídos aos arquivos vetoriais de

ponto das estações pluviométricas da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – Funceme, totalizando 70 estações, listadas na Tabela 13, contendo o município da estação, localização, altitude e período de anos de observação, compreendendo um período total de 40 anos.

Com base nas estações pluviométricas elencadas na Tabela 13, procedeu-se a tabulação dos dados por estação, coordenadas e precipitação média anual em uma planilha no formato “.csv”. Posteriormente, o arquivo foi importado para o ambiente SIG no software QGIS.

Tabela 13 - Estações pluviométricas por município, coordenadas e altitude, no período de 1981 a 2021

Município	Lat	Long	Altitude (m)	Município	Lat	Long	Altitude (m)
Acaraú	-2.8232	-40.2224	9	Jaguaribe	-6.0740	-38.8674	239
Aiuaba	-7.3620	-39.0477	592	Jucás	-7.0008	-39.7372	229
Alto Santo	-5.4063	-38.1852	103	Mauriti	-3.3611	-39.8269	398
	-5.5129	-38.2654	239	Milhã	-5.5594	-39.1634	199
Amontada	-3.2746	-39.9049	29	Mombaça	-5.6512	-39.8444	323
	-3.0058	-39.7048	6	Monsenhor Tabosa	-4.7971	-40.0636	703
Apuiarés	-3.9500	-39.4333	308	Morada Nova	-5.2572	-38.6451	126
Aracoiaba	-4.3733	-38.8090	900		-5.1366	-38.4663	58
Ararendá	-4.7501	-40.8279	390	Novo Oriente	-5.5094	-40.8558	402
Arneiroz	-2.8859	-40.1184	393	Penaforte	-6.7672	-39.9856	503
Assaré	-6.1108	-39.4427	441	Piquet Carneiro	-5.9426	-39.5255	308
Barroquinha	-3.0238	-41.1293	28	Poranga	-4.7956	-41.0975	309
Beberibe	-4.3729	-37.9245	11	Potiretama	-5.7230	-38.1516	172
Bela Cruz	-2.9420	-40.2772	29	Quiterianópolis	-6.0500	-40.7500	563
Boa Viagem	-5.1249	-39.7325	290		-3.9000	-38.3833	553
Brejo Santo	-6.5670	-40.1167	395	Quixadá	-5.0002	-39.1769	270
Camocim	-2.9000	-40.8450	13		-4.9670	-39.0333	198
Caridade	-4.2330	-39.2667	122	Quixeré	-5.0822	-37.9125	137
Caririaçu	-3.5854	-40.5442	322	Salitre	-4.5685	-37.7747	676
Cascavel	-4.4976	-38.3605	52	Santa Quitéria	-4.3251	-39.8120	308
Catunda	-4.5113	-40.1702	235	Santana do Cariri	-4.3733	-38.8090	900
Coreaú	-3.6409	-40.6204	104	São Benedito	-4.0533	-41.0556	624
	-3.5275	-40.7075	70	São Luís do Curu	-3.6723	-39.2422	31
Ererê	-5.9281	-38.2309	174	Senador Sá	-3.1831	-40.4524	47
Forquilha	-3.8920	-40.2582	114		-3.1831	-40.4524	47
Fortaleza	-3.7500	-38.5833	26	Tamboril	-4.9873	-40.1585	455
Frecheirinha	-3.7590	-40.8101	115		-5.0633	-40.2922	367
Granja	-3.3526	-41.2671	63	Tauá	-7.2000	-40.1333	513
Icapuí	-4.8269	-37.2684	24	Trairi	-3.2764	-39.2651	20
Independência	-5.6211	-40.2952	367		-3.4087	-39.3270	37
Irauçuba	-3.7460	-39.7785	150	Umari	-4.4169	-39.0471	277
	-3.9252	-39.7143	187	Uruoca	-3.2316	-40.7947	39
Itatira	-4.5286	-39.6347	830		-3.3681	-40.7339	57
	-4.6055	-39.6471	449	Viçosa do Ceará	-3.5719	-41.3258	385
Jaguaretama	-5.4239	-38.7728	169		-3.5683	-41.0946	721

Fonte: Elaborado pelo autor.

O dado foi então convertido para o formato *shapefile* visando estimar os valores de intensidade pluviométrica calculados por meio da razão entre precipitação média anual (PMA) e duração do período chuvoso (DPC) (Crepani *et al.*, 2001), que no caso da área estudada corresponde à quadra chuvosa, portanto, igual a 4, através da Equação 48.

$$IP = \frac{PMA}{DPC} \quad (48)$$

Em seguida, os dados de Intensidade Pluviométrica foram espacializados por meio do método da ponderação do inverso da distância (*Inverse Distance Weighting – IDW*), que se baseia na média ponderada, atribuindo-se peso maior ao ponto mais próximo, assumindo-se que cada ponto utilizado possui uma influência local que diminui com o aumento da distância e em função da potência atribuída (RIGI; BASSO, 2016), normalmente de expoente 2, apresentando resultados satisfatórios a exemplo dos trabalhos propostos por Righi e Basso (2016), Muniz *et al.* (2017) e Magalhães *et al.* (2019).

Após a espacialização dos dados pluviométricos e gerada a Intensidade Pluviométrica para o estado do Ceará, o dado matricial obtido foi reclassificado com base na classificação proposta por Crepani *et al.* (2001), tomando como base os valores da escala de erosividade da chuva.

Na sequência, estimou-se a função de associação relativa à Intensidade Pluviométrica por intermédio da Equação 49, por meio de uma função linear crescente:

$$\mu(CLIM) = \left(\frac{a_{i_{CLIM}} - \text{mín}_{CLIM}}{r_{CLIM}} \right) \quad (49)$$

Onde, *CLIM* é a vulnerabilidade do critério clima; $\mu(CLIM)$ é o valor de associação; $a_{i_{CLIM}}$ é o valor da *i-ésima* alternativa do critério CLIMA; $r_{CLIM} = \text{máx}_{CLIM} - \text{mín}_{CLIM}$ é a amplitude do critério CLIMA, representada pelos valores das alternativas. Os valores normalizados $\mu(CLIM)$ variam de 0 a 1, sendo 0 o valor do resultado menos desejável e 1 é o valor atribuído ao resultado mais desejável.

4.3.2 Uso e cobertura da terra

Os dados de uso e cobertura da terra foram obtidos da Plataforma do Projeto Mapbiomas (MAPBIOMAS, 2021) que tem como objetivo o mapeamento anual da superfície do solo a nível nacional, dispondo de arquivos no formato *raster* com resolução espacial de 30 metros, cujos valores de pixels compreendem classes de uso e cobertura, tendo sido selecionado

para o presente trabalho o ano de 2021. Após a obtenção do arquivo *raster* para todo o território nacional, procedeu-se a importação para ambiente SIG, aplicando-se uma operação de corte equivalente à área do Ceará.

O Quadro 6 mostra as classes de uso mapeadas pelo projeto e suas respectivas descrições. Para geração do tema uso e cobertura da terra foram definidos os pesos para cada classe mapeada com base na literatura de acordo com o grau de vulnerabilidade, sob uma perspectiva conservacionista, o que implica que áreas mais conservadas, do ponto de vista do cometimento de infrações ambientais, são mais vulneráveis e conseqüentemente maiores os danos ambientais nelas cometidos.

Quadro 6 - Classes de uso e sua descrição

Classes de Uso	Descrição
Formação Florestal	Tipos de vegetação com predomínio de dossel contínuo - Savana-Estépica Florestada, Floresta Estacional Semidecidual e Decidual. Vegetação densa, com poucos indivíduos herbáceos e cactáceas e maior frequência de indivíduos arbóreos, arbustos e árvores. Composta por florestas que apresentam árvores que podem atingir até 20 metros de altura.
Formação Savânica	Tipos de vegetação com predomínio de espécies de dossel semi-contínuo - Savana-Estépica Arborizada, Savana Arborizada. Vegetação aberta composta por árvores que podem atingir os doze metros de altura, as quais naturalmente apresentam-se relativamente adensadas, cujo dossel superior é ramificado e pouco espesso.
Formação Campestre	Tipos de vegetação com predomínio de espécies herbáceas (Savana-Estépica Parque, Savana-Estépica Gramíneo-Lenhosa, Savana Parque, Savana Gramíneo-Lenhosa) + (Áreas inundáveis com uma rede de lagoas interligadas, localizadas ao longo dos cursos de água e em áreas de depressões que acumulam água, vegetação predominantemente herbácea a arbustiva). Vegetação aberta com porte mediano com domínio de arbustos, normalmente menor que três metros, com pouca ocorrência de árvores, com indivíduos emergentes dispersos que raramente ultrapassam sete metros de altura, com diversas herbáceas efêmeras.
Afloramento Rochoso	Rochas naturalmente expostas na superfície terrestre sem cobertura de solo, muitas vezes com presença parcial de vegetação rupícola e alta declividade.
Pastagem	Área de pastagem, predominantemente plantadas, vinculadas a atividade agropecuária. As áreas de pastagem natural são predominantemente classificadas como formação campestre que podem ou não ser pastejadas.
Agricultura	Áreas predominantemente ocupadas com cultivos anuais e, em algumas regiões (principalmente para a região Nordeste) com a presença de cultivos perenes.
Mangue	Formações florestais, densas, sempre-verdes, frequentemente inundadas pela maré e associadas ao ecossistema costeiro de Manguezal.
Apicum	Apicuns ou Salgados são formações quase sempre desprovidas de vegetação arbórea, associadas a uma zona mais alta, hipersalina e menos inundada do manguezal, em geral na transição entre este e a terra firme
Corpo D'água	Rios, lagos, represas, reservatórios e outros corpos d'água
Campo Alagado e Área Pantanosa	Vegetação com influência fluvial e/ou lacustre.
Praia, Duna e Cordões Arenosos	Cordões arenosos, de coloração branco brilhante, onde não há o predomínio de vegetação de nenhum tipo.

continua

Restinga	Formações florestais que se estabelecem sobre solos arenosos ou sobre dunas na zona costeira, bem como vegetação herbácea com influência fluviomarina.
Silvicultura / Floresta Plantada	Florestas compostas predominantemente por árvores que resultam de semeadura ou plantio, cultivadas com enfoque econômico e com fins comerciais.
Área Urbanizada	Áreas com significativa densidade de edificações e vias, incluindo áreas livres de construções e infraestrutura.
Mineração	Áreas referentes a extração mineral de porte industrial ou artesanal (garimpos), havendo clara exposição do solo por ação antrópica.
Solo exposto	Áreas de superfícies não permeáveis (infraestrutura, expansão urbana ou mineração) não mapeadas em suas classes e regiões de solo exposto em área natural ou em áreas de cultura em entressafrá.
Outras Formações Não Florestais	Áreas de várzea e restingas herbáceas.

Fonte: Adaptado de Mapbiomas (2021).

Nos casos das classes restinga com estrato herbáceo, arbustivo e arbóreo, praias, cordões arenosos e dunas, em razão de serem, segundo a Lei 12.651/2012 (BRASIL, 2012) consideradas objeto de especial preservação, e considerando o cálculo previsto na Equação 50, atribui-se valor 1,0 na escala de vulnerabilidade, conforme pode ser visualizado na Tabela 14 juntamente com as demais classes de uso.

Tabela 14 - Classes de uso, valores de vulnerabilidade ambiental

Classes de Uso	Escala de Vulnerabilidade
Formação Florestal	1,0
Restinga Arbustiva (das dunas), Restinga Herbácea (das praias), Restinga Arbórea, Praia, Duna e Cordões Arenosos.	1,0
Mangue	1,4
Apicum	1,4
Corpo D'água	1,5
Campo Alagado e Área Pantanosa	2
Praia, Duna e Areal	2
Formação Savânica	2,1
Outras Formações não Florestais	2,6
Silvicultura	2,6
Floresta Plantada	2,6
Aquicultura	2,6
Formação Campestre	2,7
Agricultura	2,7
Pastagem	2,8
Área Urbanizada	2,8
Afloramento Rochoso	2,9
Solo exposto	2,9
Mineração	2,9

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001); São Miguel, Medeiros e Gomes (2018); Teruiya Junior *et al.* (2018); Rosa e Ferreira (2021); Silva, Ferreira e Loureiro (2021); Silva *et al.* (2020); Demarchi e Pisani (2019).

Para determinar o grau de pertinência, tendo como base os valores de vulnerabilidade propostos na literatura, utilizou-se a Equação 50, que representa uma função linear decrescente:

$$\mu(USCO) = \left(\frac{máx_{USCO} - a_{i_{USCO}}}{r_{USCO}} \right) \quad (50)$$

Onde: *USCO* corresponde às tipologias de uso e cobertura da terra com seus valores numéricos de vulnerabilidade atribuídos; $\mu(USCO)$ é o valor de associação *fuzzy* para o critério Uso e Cobertura da Terra; $a_{i_{USCO}}$ é o valor da *i-ésima* alternativa do critério USCO; $r_{USCO} = máx_{USCO} - mín_{USCO}$ é a amplitude do critério USCO, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $\mu(USCO)$ variam de 0 a 1, sendo 0 o valor do resultado menos desejável e 1 é o valor atribuído ao resultado mais desejável.

4.3.3 Geologia

Para o critério geologia foi utilizada a proposta de Crepani *et al.* (2001) quanto à escala de vulnerabilidade à denudação das rochas, levando-se em consideração a composição química das rochas.

No trabalho, os autores propõem uma organização sequencial decrescente de resistência ao intemperismo para rochas ígneas, que vai desde o riólito até o dunito; rochas metamórficas, desde o quartzito até o mármore; e rochas sedimentares, indo desde o arenito quartzoso até os sedimentos inconsolidados. Em todos os tipos de rochas apontadas, a escala de vulnerabilidade segue das rochas mais resistentes ao intemperismo, cujo valor atribuído se aproxima de 1, até as menos resistentes, cujo valor se aproxima de 3.

Os dados vetoriais de geologia foram adquiridos na base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2019) na escala de 1:250.000.

As classes litológicas e seus valores de vulnerabilidade estão apresentados na Tabela 15:

Tabela 15 - Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas

Tipos de Rochas	Litologias	Escala de Vulnerabilidade
Metamórficas	Quartzitos ou metaquartzitos	1,1
Ígneas	Riólito, Granito, Dacito	1,1
Ígneas Intrusivas	Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Metamórficas	Migmatitos, Gnaisses	1,3
Ígneas Intrusivas	Fonólito, Nefelina Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Ígneas	Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Ígneas Intrusivas	Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Metamórficas	Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita-xisto, Clorita xisto	1,7
Ígneas e Metamórficas	Piroxenito, Anfíbolito Kimberlito, Dunito	1,8
Ígneas	Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9
Metamórficas	Estaurólita xisto, Xistos granatíferos	2,0
Metamórficas	Filito, Metassiltito	2,1
Metamórficas	Ardósia, Metargilito	2,2
Metamórficas	Mármore	2,3
Sedimentares	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Sedimentares	Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Sedimentares	Grauvacas, Arcózios	2,6
Sedimentares	Siltitos, Argilitos	2,7
Sedimentares	Folhelhos	2,8
Sedimentares	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Sedimentares	Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* 2001 e Spörl (2007).

Os referidos valores então terão seus graus de pertinência determinados por meio da Equação 51, representando uma função linear crescente, tendo como base os valores de vulnerabilidade constantes da Tabela 15:

$$\mu(GEOL) = \left(\frac{a_{i_{GEOL}} - \text{mín}_{GEOL}}{r_{GEOL}} \right) \quad (51)$$

Onde: $GEOL$ é a vulnerabilidade da geologia; e $\mu(GEOL)$ é o valor de associação *fuzzy* das classes litológicas; $a_{i_{GEOL}}$ é o valor da i -ésima alternativa do critério $GEOL$; $r_{GEOL} = \text{máx}_{GEOL} - \text{mín}_{GEOL}$ é a amplitude do critério $GEOL$, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $\mu(GEOL)$ variam de 0 a 1.

4.3.4 Pedologia

O solo é um recurso natural fundamental para a manutenção da qualidade ambiental, uma vez que desempenha uma série de funções ecossistêmicas, tais como a proteção contra a erosão hídrica e eólica, a filtragem e armazenamento da água da chuva, além de ser um importante reservatório de carbono.

Os dados vetoriais de pedologia foram adquiridos através do Instituto Brasileiro de

Geografia e Estatística (IBGE, 2019) na escala de 1:250.000.

Para este trabalho, adotou-se a classificação de vulnerabilidade dos solos a processos erosivos proposta por Crepani *et al.* (2001). Para áreas onde ocorrem solos estáveis são atribuídos valores próximos a 1,0. Áreas de ocorrência de solos intermediários atribuem-se valores de estabilidade 2,0. Solos vulneráveis recebem valores próximos a 3,0. As classes de solo e seus valores de vulnerabilidade são apresentados na Tabela 16:

Tabela 16 - Valores de vulnerabilidade/estabilidade dos solos

Classe de Solo	Escala de Vulnerabilidade
Latossolos Amarelos Latossolos Vermelho-Amarelos Latossolos Vermelhos Latossolos Brunos Latossolos (...) Húmicos Latossolos Bruno (...) Húmicos	1,5
Argissolos Alissolos Nitossolos Luvisolos Chernossolos Planossolos Espodossolos	2,0
Cambissolos	2,5
Neossolos Litólicos Neossolos Flúvicos Neossolos Regolíticos Neossolos Quartzarênicos Vertissolos Organossolos Gleissolos Plintossolos Afloramento Rochoso	3,0

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

Os valores terão seus graus de pertinência determinados por meio da Equação 52, que representa uma função linear crescente:

$$\mu(PEDO) = \left(\frac{a_{i_{PEDO}} - \text{mín}_{PEDO}}{r_{PEDO}} \right) \quad (52)$$

Onde: $PEDO$ é a vulnerabilidade da pedologia; e $\mu(PEDO)$ é o valor de associação *fuzzy* das classes pedológicas; $a_{i_{PEDO}}$ é o valor da i -ésima alternativa do critério $PEDO$; $r_{PEDO} = \text{máx}_{PEDO} - \text{mín}_{PEDO}$ é a amplitude do critério $PEDO$, representada pelos valores das alternativas. Os valores normalizados $\mu(PEDO)$ variam de 0 a 1.

4.3.5 Declividade

Para construção do critério declividade, foram utilizados dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial reamostrada a 30 metros, a partir da grade vetorial do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil Topadata do INPE, com imagens do tipo Modelo Digital de Elevação (MDE), articuladas na escala de 1:250.000.

O conceito de declividade refere-se à inclinação do terreno em relação à linha do horizonte. A declividade está diretamente relacionada à taxa de conversão de energia potencial em energia cinética e, conseqüentemente, com a velocidade do fluxo de água em movimento responsável pelo processo de escoamento superficial. Quanto maior a declividade, mais rápida será a transformação da energia potencial das águas pluviais em energia cinética, resultando em um aumento na velocidade do fluxo de água e, conseqüentemente, na capacidade de transporte das massas de água. Este fenômeno é responsável pela erosão que molda as formas de relevo e, portanto, é fundamental para a morfogênese (Crepani *et al.*, 2001).

Nesse contexto, quanto maior a vulnerabilidade a processos morfogenéticos de uma dada área, potencialmente, maior será a gravidade ao se causar um dano ambiental, já que a área naturalmente está sujeita a processos morfogenéticos. Dessa forma, para estimar a função de pertinência, utilizou-se a Equação 53 (ESRI, 2018):

$$\mu(DECL) = \frac{1}{1 + \left(\frac{a_{iDECL}}{mp}\right)^{-5}} \quad (53)$$

Onde: *DECL* é a declividade da área expressa em graus ou %; $\mu(DECL)$ é o valor de associação *fuzzy* da declividade; a_{iDECL} é o valor da *i*-ésima alternativa do critério declividade; *mp* assume valor 25° ou 47%, nas declividades em graus e percentual, respectivamente. Neste trabalho, adotou-se a declividade em percentual.

De acordo com a função, valores maiores do que *mp* são associados a valores de gravidade mais altos.

O Código Florestal Brasileiro utiliza a declividade de 25° (graus) como referência para delimitação de Áreas de Preservação Permanente – APP de topo de morro (art. 4º, XIX), bem como para restringir usos por meio de Áreas de Uso Restrito, entendidas como “áreas de inclinação entre 25° e 45°”, em seu art. 11 (BRASIL, 2012). Diante disso, para este trabalho, em áreas com declividades a partir de 25° ou 47% relacionam-se às gravidades máximas.

4.3.5 Distância de vias

Estradas causam diversos efeitos nocivos sobre os sistemas florestais, incluindo mortalidade direta de espécies florestais devido à construção de estradas e colisões com veículos (GOOSEM, 2007), modificação do comportamento normal de animais em razão do afugentamento (LAURANCE *et al.*, 2004), introdução de organismos exóticos invasores e patógenos (FORMAN; DEBLINGER, 2000; GOOSEM, 2007) e degradação de habitat devido à poluição química, aumento da erosão do solo e sedimentação de córregos (FORMAN; DEBLINGER, 2000).

A construção de novas estradas também resulta na divisão de grandes áreas florestais em manchas menores com formas alteradas, criação de habitats de borda de alto contraste e redução da conectividade da paisagem para espécies especialistas (GOOSEM, 2007). As vias funcionam como vetores de degradação ambiental. Estradas e outras infraestruturas lineares estão entre as características que mais marcam a presença da atividade humana e são conhecidas por causarem importantes impactos ambientais em habitats naturais e ecossistemas. De acordo com Wilkie *et al.* (2000) estradas e rodovias pavimentadas têm um papel fundamental no desmatamento de florestas e acesso às atividades de mineração.

Os dados vetoriais referentes à infraestrutura de vias (estradas e rodovias) foram obtidos da base de dados do DNIT. Após a aquisição dos dados vetoriais, estes foram reprojatados para o Sistema de Referência Geodésico para as Américas 2000 - SIRGAS 2000, UTM zona 24 Sul. Em seguida, o arquivo foi rasterizado e, a partir deste, criado um mapa de distância usando a ferramenta de *Distância Euclidiana* no QGIS, a partir do qual obteve-se um novo *raster* de valores contínuos, que foi reclassificado segundo as regras constantes da Equação 54, representando uma função linear decrescente:

$$\mu(DVIAS) = \left(\frac{máx_{DVIAS} - a_{i_{DVIAS}}}{r_{DVIAS}} \right) \quad (54)$$

Onde: $DVIAS$ é a distância de vias com área em metros; e $\mu(DVIAS)$ é o valor de associação *fuzzy* das distâncias definidas; $a_{i_{DVIAS}}$ são o valor da *i-ésima* alternativa do critério $DVIAS$; $r_{CLIM} = máx_{DVIAS} - mín_{DVIAS}$ é a amplitude do critério $DVIAS$, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $\mu(DVIAS)$ variam de 0 a 1.

4.3.6 Distância de recursos hídricos

Recursos hídricos são áreas sensíveis que devem ser mantidas distantes de atividades degradadoras. Dessa forma, quanto mais próxima a ocorrência de uma infração ambiental for de um recurso hídrico, maior será sua influência na gravidade do fato, considerando as consequências que as atividades efetiva ou potencialmente causadoras de impacto ambiental causam nos recursos hídricos.

Após a aquisição dos dados vetoriais, estes foram reprojatados para o Sistema de Referência Geodésico para as Américas 2000 - SIRGAS 2000, UTM zona 24 Sul. Em seguida, o arquivo foi rasterizado e, a partir deste, criado um mapa de distância usando a ferramenta de *Distância Euclidiana* no QGIS, a partir do qual obteve-se um novo *raster* de valores contínuos e submetidos ao processo de normalização. Para isto, uma função de pertinência *fuzzy* foi definida, considerando as restrições previstas na lei. Tal função está representada na Equação 55:

$$\mu(DIRH) = \left(\frac{máx_{DIRH} - a_{i_{DIRH}}}{r_{DIRH}} \right) \quad (55)$$

Onde: $DIRH$ é a distância de recursos hídricos com área em metros; e $\mu(DIRH)$ é o valor de associação *fuzzy* das distâncias definidas; $a_{i_{DIRH}}$ é o valor da i -ésima alternativa do critério $DIRH$; $r_{DIRH} = máx_{DIRH} - mín_{DIRH}$ é a amplitude do critério $DIRH$, representada pelos valores da alternativas. Os valores normalizados $\mu(DIRH)$ variam de 0 a 1.

4.4 Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA

O Índice de Gravidade da Infração Ambiental foi estruturado a partir da combinação dos critérios por meio da aplicação da Combinação Linear Ponderada (Equação 45), gerando um dado matricial que corresponde ao mapa de gravidade da infração ambiental. Este dado é parte componente da variável g apresentada na Equação 25, representando um *raster* de valores contínuos que variam de zero a 1, conforme a escala padrão de normalização de dados aplicada a todos os critérios da análise.

Nesta escala, valores mais baixos indicam gravidade mais baixa, enquanto os mais elevados apontam para maior gravidade. Os valores registrados variaram entre 0,242 e 0,971, não atingindo os limites mínimo ou máximo da escala. Isso se deve à natureza da metodologia de análise multicritério, que busca uma compensação entre os critérios ao aplicar diferentes

pesos. Assim, um critério com peso mais baixo pode ser equilibrado por outro com peso mais alto, evitando que se alcancem os extremos zero e 1 da escala.

O mapa de valores contínuos foi reclassificado do formato numérico para categórico, com vistas a representá-los por meio de classes na forma temática. Os limites das classes foram determinados por *Otimização de Jenks*, método de classificação de dados de quebras naturais que utiliza um algoritmo iterativo que reduz a variância dentro dos grupos e maximiza a variância entre os diferentes grupos (Mello, 2019).

O mapa então foi representado por cinco classes, conforme representado na Tabela 17:

Tabela 17 - Classes de gravidade por intervalos

Classe de Gravidade	Intervalo	Cor
Gravidade Muito Baixa	$g_{IGIA} \leq 0,405$	
Gravidade Baixa	$0,405 < g_{IGIA} \leq 0,490$	
Gravidade Média	$0,490 < g_{IGIA} \leq 0,584$	
Gravidade Alta	$0,584 < g_{IGIA} \leq 0,707$	
Gravidade Muito Alta	$0,707 < g_{IGIA}$	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Gravidade Muito Baixa: A classe de gravidade “Muito Baixa” cobre uma área de 22.431,72 km², equivalendo a 15,08%, figurando na quarta posição em termos de abrangência em relação à área total do estado do Ceará. As áreas abrangidas por esta classe de gravidade ocorrem predominantemente nos Sertões Cearenses, Tabuleiros Interiores, bem como no Reverso da Serra da Ibiapaba. A vegetação característica abrange a classe Caatinga Arbustiva Aberta, Caatinga Arbustiva Densa, Floresta Caducifólia Espinhosa (Caatinga Arbórea) e Carrasco. A declividade nessas áreas se caracteriza por relevo plano a suave ondulado (até 8%). Os solos que compõem a área são os Argissolos, Luvisolos e Planossolos. Em termos climáticos, apresenta intensidade pluviométrica abaixo de 150 mm/mês. As principais classes de uso e cobertura são: Agricultura, Pastagem, Áreas Urbanas, Solo Exposto, Mineração, Formação Savânica e Afloramentos Rochosos.

Gravidade Baixa: A classe de gravidade “Baixa” abrange uma área de 51.283,82 km² (34,47%), sendo a mais representativa na área estudada. Abrange predominantemente os Sertões Cearenses, parte da Chapada do Araripe e do Apodi. A vegetação característica é composta por Caatinga Arbustiva Aberta, Caatinga Arbustiva Densa, Floresta Caducifólia Espinhosa (Caatinga Arbórea) e Carrasco. Apresenta uma declividade caracterizada por relevo plano a suave ondulado (até 8%). Além dos Argissolos, Luvisolos e Planossolos, também abrange os solos Chernossolos, Latossolos, Cambissolos. Em termos climáticos, essa classe de gravidade apresenta intensidade pluviométrica na ordem de até 200 mm/mês. As principais

classes de uso e cobertura são: Agricultura, Pastagem, Áreas Urbanas, Solo Exposto, Mineração, Aquicultura, Formação Savânica, Formação Campestre, Afloramentos Rochosos.

Gravidade Média: A classe de gravidade “Média” perfaz uma área de 42.001,60 km², correspondendo a 28,23% da área do estado, sendo a segunda classe mais representativa. Essa classe ocorre predominantemente nos Sertões Cearenses, Tabuleiros Costeiros e Interiores, e Chapada do Apodi, apresentando uma vegetação característica de Caatinga Arbustiva Densa, Floresta Mista Dicotilo-Palmaceae (Mata Ciliar com Carnaúba), Floresta Caducifolia Espinhosa (Caatinga Arbórea), Caatinga Arbustiva Aberta e Carrasco. A declividade predominante varia entre relevo plano a suave ondulado (até 8%). Os solos predominantes são Argissolos, Planossolos, Neossolos, Cambissolos e Vertissolos. A intensidade pluviométrica chega a 225 mm/mês e as categorias de uso e cobertura compreendem Agricultura, Pastagem, Áreas Urbanas, Solo Exposto, Mineração, Aquicultura, Formação Florestal, Formação Savânica, Praia, Duna e Areal, Restinga.

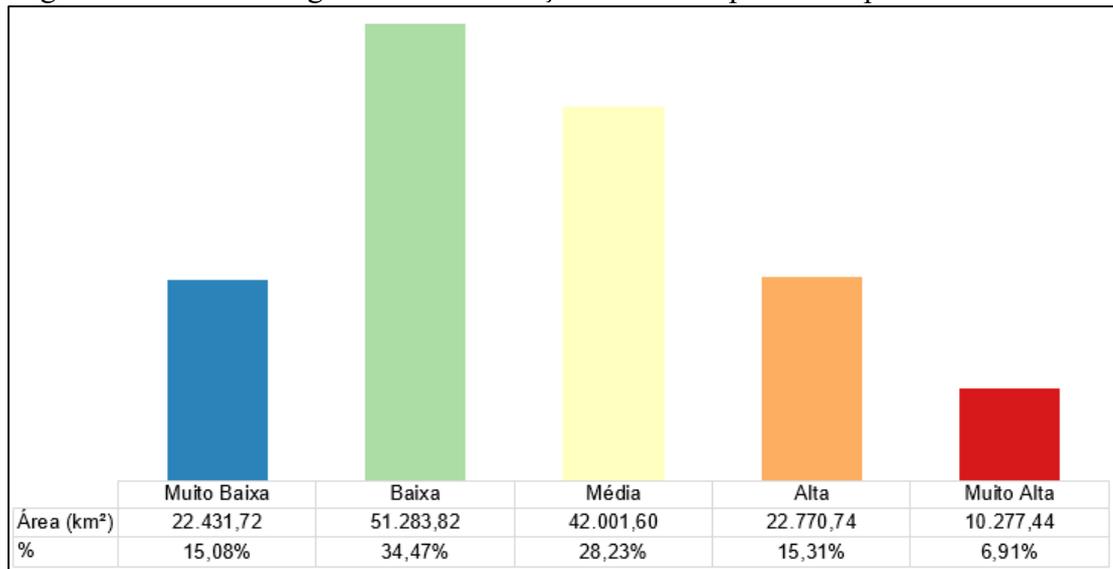
Gravidade Alta: A classe de gravidade “Alta” recobre uma área de 22.770,74 km² (15,31%), ocorrendo nas áreas de Planície Litorânea, nas Serras Secas dispostas nos sertões cearenses, reverso do Planalto da Ibiapaba e Chapada do Araripe. Abrange as categorias de vegetação Floresta Subperenifolia Tropical Pluvio-Nebular (Mata Úmida), Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial (Mata Seca), Floresta Subcaducifolia Tropical Xeromorfa (Cerradão), Caatinga Arbustiva Densa e Carrasco. Apresenta relevo plano a suave ondulado no Planalto da Ibiapaba e Chapada do Araripe (região plana de altitude) e relevo forte ondulado a montanhoso nas serras úmidas e secas. Os solos predominantes são: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos, Gleissolos, Neossolos e Vertissolos. Em termos climáticos, apresenta intensidade pluviométrica na ordem de até 275 mm/mês. Os tipos de uso e cobertura nessa classe são: Formação Florestal, Formação Savânica, Água, Praia, Duna e Areal, Mangue, Restinga.

Gravidade Muito Alta: a classe de gravidade “Muito Alta”, a menos representativa, abrange 10.277,44 km² (6,91%), predominando em toda a região dos Tabuleiros Costeiros, mais densamente a oeste do estado, encostas do Planalto da Ibiapaba e Chapada do Araripe, nas serras úmidas e serras secas dispostas nos Sertões cearenses, concentrando-se principalmente na região Noroeste do Ceará. A vegetação característica da região inclui Floresta Subperenifolia Tropical Pluvio-Nebular (Mata Úmida), Floresta Subcaducifolia Tropical Pluvial (Mata Seca), Complexo Vegetacional da Zona Litorânea, Floresta Caducifolia Espinhosa (Caatinga Arbórea), manchas de cerrado. O relevo predominante na classe é composto por áreas com relevo forte ondulado (serras úmidas, serras secas e escarpas do

Planalto da Ibiapaba e Chapada do Araripe) e áreas com relevo plano a suave ondulado, quando na região costeira. Os solos predominantes são: Latossolos, Argissolos, Neossolos, Planossolos e Gleissolos. Em termos climáticos, a intensidade pluviométrica chega a 300 mm/mês. Os tipos de uso e cobertura predominante abrange a Formação Florestal, Água, Mangue, Apicum.

O gráfico da Figura 18 apresenta os dados quantitativos das áreas e percentuais de gravidade da infração ambiental no território do estado do Ceará.

Figura 18 - Classes de gravidade da infração ambiental por área e percentual



Fonte: Elaborado pelo autor.

As classes “Muito Baixa”, “Baixa” e “Média” apresentam as tipologias de uso e cobertura da terra que refletem uma maior pressão sobre o ambiente. Combinado com a importância/peso do critério USCO na composição do IGIA, isso resulta numa maior prevalência de áreas com pontuações menores em termo de gravidade, o que resulta em multas menores, diferentemente das áreas das classes de gravidade “Alta” e “Muito Alta” que, por apresentarem classes de cobertura mais conservadas, são áreas cujas sanções são maiores, já que o valor ambiental da área é refletido pelo índice na forma de gravidade e convertido em valor monetário para fins de multa.

A Tabela 18 mostra as estatísticas para o IGIA na área de aplicação da proposta metodológica. Em média, os valores situam-se em torno de 0,511, com máximo de 0,971 e mínimo de 0,242. Além disso, o coeficiente de variação de 17,79%, indicando uma variação moderada nos valores. O desvio padrão de 0,091 indica uma estabilidade nos critérios componentes do IGIA, estando a maioria dos dados mais concentrada em torno da média.

Tabela 18 - Estatísticas do IGIA para o Ceará

Estatística	Valor
Mínimo	0,242
Máximo	0,971
Média	0,511
Desvio padrão	0,091
CV	17,79%

Fonte: Elaborado pelo autor.

No tocante às bacias hidrográficas do estado, considerando-se a média do IGIA total, estas apresentaram diferenças entre si. As médias das bacias do Alto Jaguaribe (0,479), do Médio Jaguaribe (0,466), do Banabuiú (0,465) e dos Sertões de Crateús (0,438) apresentaram valores abaixo da média do estado (0,511), o que indica que os valores de gravidade e conseqüentemente das multas serão menores nessas bacias.

As médias das bacias do Acaraú (0,525), do Baixo Jaguaribe (0,509), do Coreaú (0,643), do Curu (0,531), do Litoral (0,538), Metropolitana (0,536), do Salgado (0,526) e da Serra da Ibiapaba (0,589) apresentaram valores iguais ou maiores do que a média do estado. Nessas bacias, as multas tendem a ser maiores. Na Tabela 19 constam os valores das medidas estatísticas por bacia hidrográfica, onde constam os valores máximo, mínimo, média, desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 19 - Medidas estatísticas para os valores de IGIA por bacia hidrográfica

Bacia Hidrográfica	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
Bacia dos Sertões de Crateús	0,283	0,862	0,438	0,057	13,03
Bacia do Banabuiú	0,300	0,900	0,465	0,059	12,59
Bacia do Médio Jaguaribe	0,305	0,885	0,466	0,063	13,51
Bacia do Alto Jaguaribe	0,242	0,891	0,479	0,070	14,52
Bacia do Baixo Jaguaribe	0,327	0,809	0,509	0,059	11,58
Bacia do Acaraú	0,299	0,939	0,525	0,082	15,54
Bacia do Salgado	0,298	0,895	0,526	0,071	13,54
Bacia do Curu	0,337	0,923	0,531	0,073	13,82
Bacia Metropolitana	0,322	0,914	0,536	0,090	16,88
Bacia do Litoral	0,343	0,894	0,538	0,088	16,34
Bacia da Serra da Ibiapaba	0,350	0,963	0,589	0,072	12,17
Bacia do Coreaú	0,358	0,971	0,643	0,109	16,98

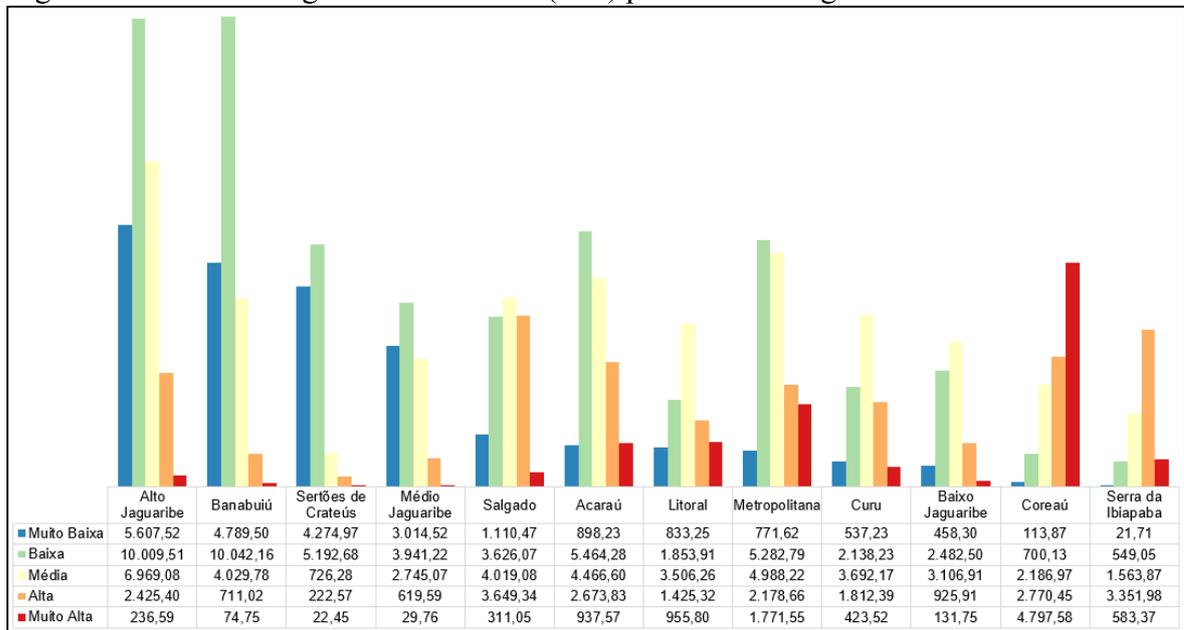
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em termos de área, a distribuição dos valores em cada categoria de gravidade varia significativamente entre as bacias, o que evidencia diferenças nas condições ambientais entre as bacias. Quanto à classe de Gravidade Muito Alta, a bacia do Coreaú apresentou os maiores quantitativos (4.797,58 km²), o que pode ser explicado por maior quantitativo de áreas com tipos de cobertura mais conservadas, com vegetação densa, o que eleva o índice para a área. As

bacias dos Sertões de Crateús e Médio Jaguaribe apresentaram os menores valores de área, com 22,45 km² e 29,76 km², respectivamente. Essas bacias possuem um alto quantitativo de áreas com usos agropecuários e vegetação com características de savana. No gráfico da Figura 19 são mostrados os valores de área em km² por classe de gravidade nas bacias hidrográficas.

Em relação às classes de Gravidade Muito Baixa, destacam-se as bacias do Alto Jaguaribe (5.607,52 km² e 10.009,51 km², respectivamente) e a bacia do Banabuiú, com 4.789,50 km² e 10.042,16 km², respectivamente. Nessas áreas, as categorias de uso predominantes, assim como nos Sertões de Crateús e Médio Jaguaribe, são agropecuária e formação savânica.

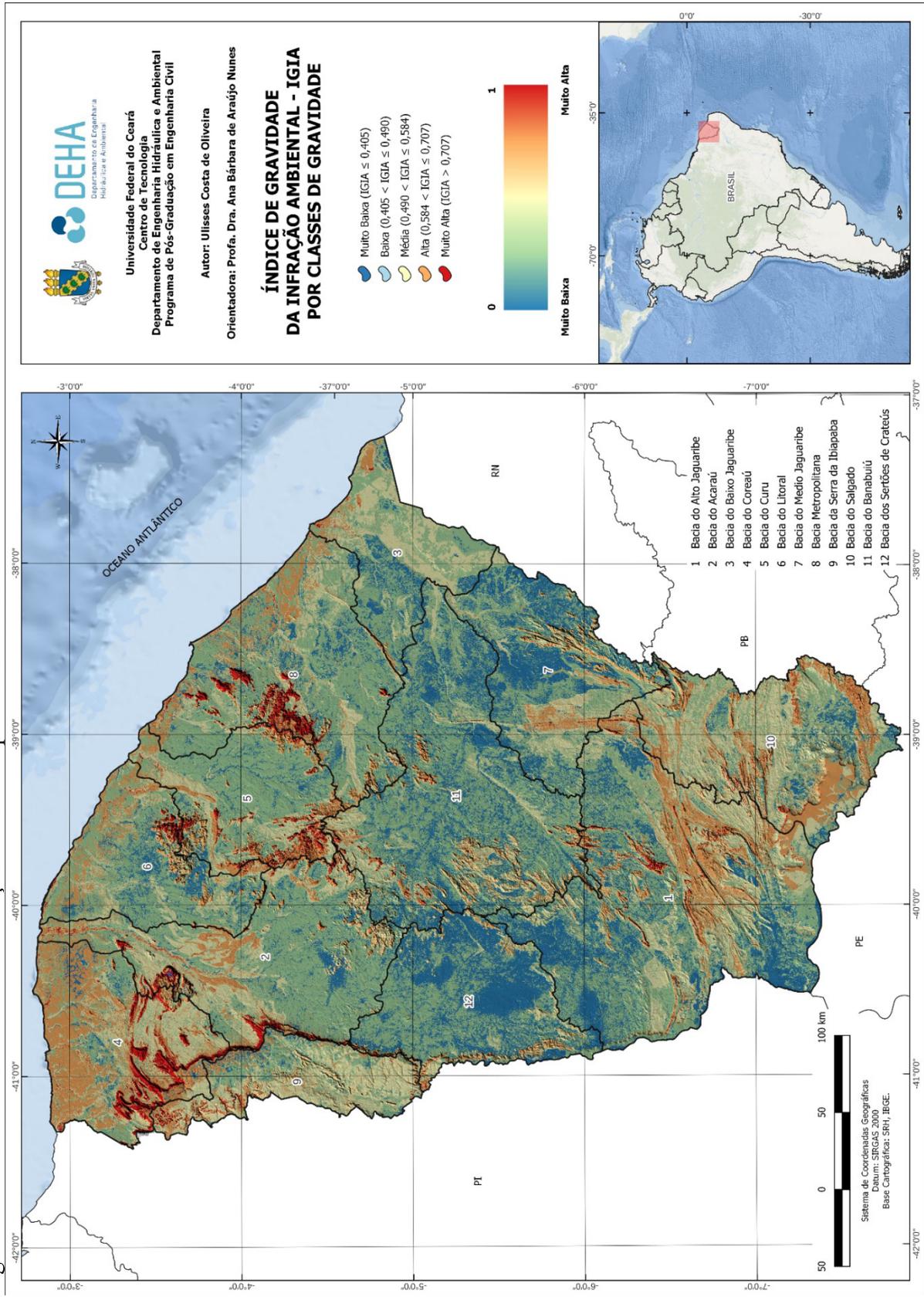
Figura 19 - Classes de gravidade em área (km²) por bacia hidrográfica



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 20 é mostrado o Índice de Gravidade da Infração Ambiental para o estado do Ceará, na qual pode-se observar a disposição das classes de gravidade, com destaque para a região Noroeste do estado, que compreende as bacias do Acaraú, Coreaú e Serra da Ibiapaba, com os valores mais altos de gravidade.

Figura 20 - Índice de Gravidade da Infração Ambiental para o estado do Ceará



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 Análise de Sensibilidade

Visando avaliar a estabilidade dos resultados obtidos em razão da incerteza oriunda dos critérios selecionados e pesos definidos, procedeu-se a análise de possíveis alterações no mapa do índice proposto por meio de uma análise de sensibilidade. Para isto, utilizou-se a abordagem descrita na seção 3.7, por meio da modificação dos pesos dos critérios/atributos no Índice de Gravidade da Infração Ambiental (IGIA). Para isto, foram consideradas as classes de gravidade aplicadas ao mapa síntese, quais sejam *Gravidade Muito Baixa*, *Gravidade Baixa*, *Gravidade Média*, *Gravidade Alta* e *Gravidade Muito Alta*. Para todos os mapas IGIA, adotou-se o mesmo intervalo de classificação aplicado ao mapa de pesos inicial.

O critério com maior peso foi *Uso e Cobertura da Terra (USCO)* apresentando um peso de 0,265. Com um incremento de 20%, os novos valores de pesos para os critérios de *Uso e Cobertura* (w_i) e *Clima* (w_j) são calculados por meio da aplicação das Equações 46 e 47, cujos resultados são mostrados abaixo:

$$w_i^{USCO} = 0,265 \pm 0,265 \times 0,2 = 0,318$$

$$w_j^{CLIM} = (1 - 0,318) \times \frac{0,119}{(1 - 0,265)} = 0,111$$

A Tabela 20 apresenta as mudanças realizadas nos demais critérios com base no critério USCO. A linha referente ao percentual 0% neste trabalho foi denominada peso base, que será o referencial para as análises das alterações aplicadas.

Tabela 20 - Pesos dos critérios alterados

%	USCO	CLIM	DVIAS	DECL	DIRH	PEDO	GEOL
-20%	0,212	0,128	0,123	0,160	0,177	0,111	0,090
-15%	0,225	0,126	0,121	0,157	0,174	0,109	0,088
-10%	0,238	0,124	0,119	0,154	0,171	0,107	0,087
-5%	0,252	0,121	0,117	0,152	0,168	0,105	0,085
0%	0,265	0,119	0,115	0,149	0,165	0,104	0,084
5%	0,278	0,117	0,113	0,146	0,162	0,102	0,082
10%	0,291	0,115	0,110	0,144	0,159	0,100	0,080
15%	0,305	0,113	0,108	0,141	0,156	0,098	0,079
20%	0,318	0,111	0,106	0,138	0,153	0,096	0,077

Fonte: Elaborado pelo autor.

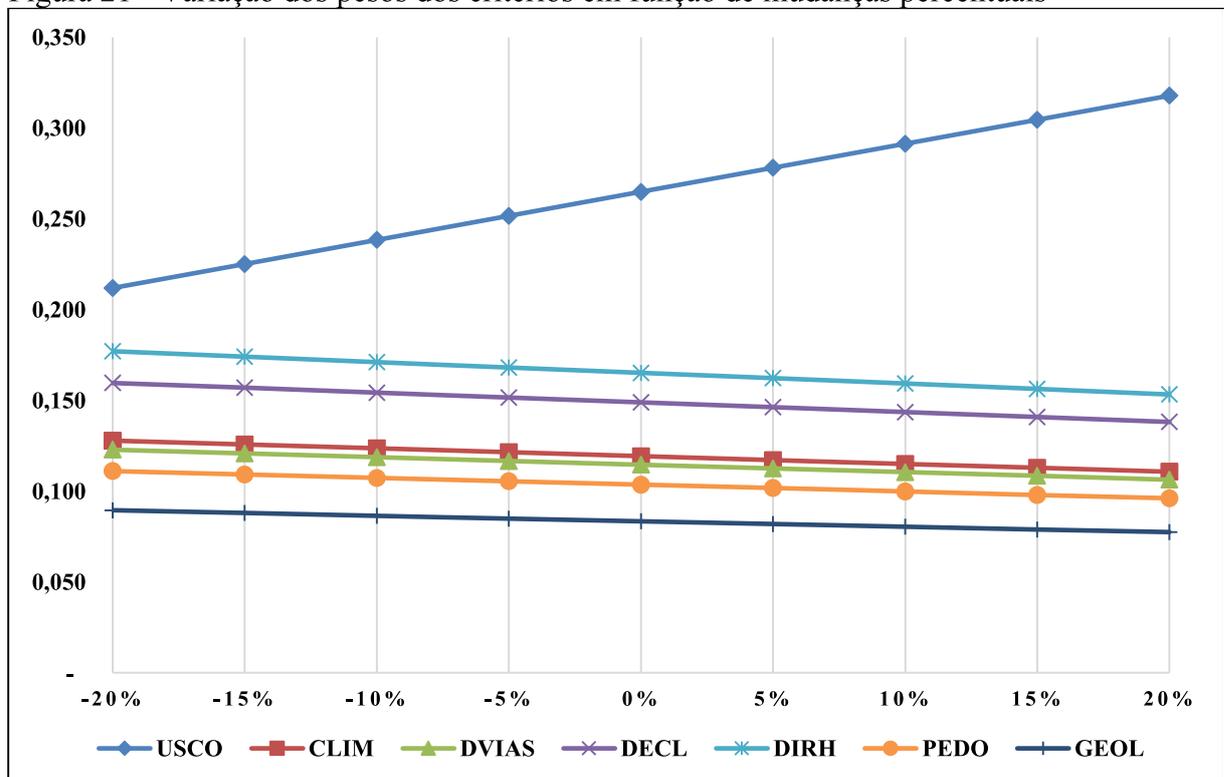
No que tange à ordenação das alternativas, em todos os cenários de variação percentual, o ranking permaneceu inalterado, na seguinte ordem: *USCO* > *DIRH* > *DECL* > *CLIM* > *DVIAS* > *PEDO* > *GEOL*, o que indica consistência dos resultados do desempenho

global obtido pelo método *FuzzyAHP*, que levou em conta a natureza subjetiva dos julgamentos realizados, indicando que pequenas perturbações (positivas ou negativas) nos pesos não alteram a ordem de importância dos critérios, o que sugere que decisões baseadas na ordem de importância desses critérios serão consistentes, mesmo se houver incertezas na atribuição dos pesos.

O gráfico da Figura 21 apresenta a variação dos pesos dos critérios em função das variações percentuais aplicadas. Nota-se uma clara tendência linear, o que ocorre em razão de a variação percentual ter sido aplicada de maneira uniforme. Além disso, pode-se visualizar uma estabilidade relativa na ordem de importância na medida em que não há cruzamentos de linhas, o que evidenciaria alteração na ordem dos critérios.

O critério USCO apresentou peso significativamente maior que os demais critérios. O critério GEOL apresentou o menor peso. Pode-se visualizar três grupos distintos: USCO, com o maior peso; DIRH, CLIM, DECL, DVIAS e PEDO com pesos mais próximos entre si, compondo um grupo intermediário; e GEOL, com menor peso, no grupo inferior. No grupo intermediário a diferença entre os pesos é pequena, principalmente quando comparada ao critério USCO.

Figura 21 - Variação dos pesos dos critérios em função de mudanças percentuais



Fonte: Elaborado pelo autor.

O gráfico da figura 21 mostra visualmente a estabilidade e robustez nos pesos dos critérios, bem como a diferença significativa entre o critério USCO e os demais critérios. Essa separação sugere que em futuras análises ou decisões, o foco nos critérios com maior peso ou agrupamento de critérios com comportamentos semelhantes pode ser útil na tomada de decisão.

Tabela 21 - Áreas (km² e %) das classes de gravidade em função da variação nos pesos

Var(%)	Muito Baixa		Baixa		Média		Alta		Muito Alta	
	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%	Km ²	%
-20%	17.848,49	-20,43	49.614,95	-3,25	44.010,05	4,78	27.457,78	20,58	9.843,14	-4,23
-15%	19.047,00	-15,09	50.121,55	-2,27	43.556,41	3,70	26.101,70	14,63	9.938,66	-3,30
-10%	20.092,57	-10,43	50.567,25	-1,40	43.009,86	2,40	25.054,76	10,03	10.040,87	-2,30
-5%	21.355,26	-4,80	50.974,19	-0,60	42.605,42	1,44	23.725,44	4,19	10.120,94	-1,52
0%	22.431,72	-	51.283,82	-	42.001,60	-	22.770,74	-	10.277,44	-
5%	23.547,70	4,97	51.570,17	0,56	41.328,01	-1,60	21.850,96	-4,04	10.477,57	1,95
10%	25.308,12	12,82	52.320,71	2,02	40.191,49	-4,31	20.326,31	-10,73	10.627,77	3,41
15%	26.620,60	18,67	52.268,88	1,92	39.490,85	-5,98	19.432,17	-14,66	10.959,36	6,64
20%	28.232,81	25,86	52.607,11	2,58	38.531,93	-8,26	18.155,34	-20,27	11.244,69	9,41

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 21 apresenta as variações em km² e percentual das classes de gravidade em função das variações nos pesos dos critérios. A Classe “Muito Baixa” apresenta aumento desde -20% até 20%, indicando que ao serem aumentados os pesos, mais área é classificada como de gravidade muito baixa.

A classe “Baixa” apresentou tendência de queda na variação negativa e aumento de área na variação 5%, com queda até 15% e novo aumento com variação de 20%, onde atingiu seu valor máximo (52.607,11 km²), porém apresentando estabilidade na variação quando consideradas as variações extremas.

A classe “Média” apresenta decréscimo constante à medida que as variações dos pesos aumentam e vice-versa. Ajustes positivos nos pesos resultam em menos áreas classificadas como de gravidade média e, contrariamente, ajustes negativos tendem a aumentar as áreas assim classificadas. O valor máximo de área para a classe “Média” ocorre na variação -20%. Da mesma forma, a classe “Alta” decresce com aumento de peso e aumenta com ajuste negativo de pesos, atingido seu máximo na variação -20%, totalizando 27.457,78 km². Por outro lado, a classe “Muito Alta” acompanha o aumento da variação dos pesos com o aumento de área.

As classes “Muito Baixa” e “Alta” são mais sensíveis aos ajustes de pesos com variação de -20,43% a 25,86% e -20,27% a 20,58%, respectivamente, porém com comportamentos inversos. As demais classes apresentaram comportamento estável em relação

às mudanças nos pesos, com variações máximas de aproximadamente $\pm 9\%$.

Ao passo que os pesos são aumentados (variação positiva), as áreas tendem a se mover das classes de gravidade mais altas para as classes mais baixas. O contrário é observado quando os pesos são diminuídos (variação negativa).

Diante das variações dos quantitativos de áreas em função das variações percentuais nos pesos, procedeu-se a análise de transição das áreas entre as classes de gravidade, utilizando-se os valores de variação máxima ($\pm 20\%$). As Tabelas 22 e 23 apresentam os valores de transição entre as classes, onde as linhas são os valores na imagem base (0%) e a colunas os valores com as variações (20%).

Tabela 22 - Transição de classes (km²) para uma variação de +20% em relação aos pesos base

Gravidade	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	TOTAL
Muito Baixa	20.788,20	1.484,14	142,97	14,93	1,48	22.431,72
Baixa	6.887,63	43.539,76	780,24	68,12	8,07	51.283,82
Média	537,92	7.359,93	33.690,31	364,14	49,30	42.001,60
Alta	16,86	212,04	3.885,26	17.392,34	1.264,24	22.770,74
Muito Alta	1,06	9,02	31,66	314,15	9.921,55	10.277,44
TOTAL	28.232,81	52.607,11	38.531,93	18.155,34	11.244,69	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 22 apresenta a transição de classes de gravidade da infração ambiental para uma variação de 20% nos pesos. Na diagonal principal da Tabela 20 encontram-se os dados que permaneceram na mesma classe de gravidade quando aplicada a variação. Os demais valores referem-se às transições entre as diferentes classes, que se mostraram muito baixas, evidenciando que a variação de 20% (máxima aplicada) não é suficiente para mover significativamente valores de uma classe para outra, ou seja, as classes são pouco sensíveis às mudanças percentuais nos pesos dos critérios.

As classes “Média” e “Baixa” apresentaram os maiores quantitativos de alteração, o que pode ser explicado pelo fato de o maior quantitativo de áreas estar concentrado nessas classes. As maiores transições ocorreram na classe “Baixa” para “Muito Baixa” (6.887,63 km²), seguida pela transição de “Média” para “Baixa” (7.359,93 km²). A classe “Alta” migrou valores altos tanto para a classe “Média” (3.885,26) como para a classe “Muito Alta” (1.264,24 km²). A classe “Muito Alta” apresentou as menores taxas de transição, exceto no caso da transição para “Alta” (314,15 km²).

Observa-se também uma estabilidade nos extremos (classes “Muito Baixa” e “Muito Alta”), com uma baixa transição, permanecendo a maior parte dos seus valores nas próprias classes, diferentemente das classes intermediárias (“Baixa”, “Média” e “Alta”) que

mostraram mais transições para os níveis imediatamente inferiores.

Nota-se, portanto, que mesmo com uma variação de 20% nos pesos, os valores das classes de gravidade tendem a permanecer na sua classificação original, com transições prevalecendo nas classes intermediárias e maior estabilidade nos extremos.

A Tabela 23 apresenta a transição de classes de gravidade da infração ambiental para uma variação de -20% nos pesos. Da mesma forma que na Tabela 22, a diagonal principal concentra os maiores valores, indicando que a maior parte dos dados permanecem em sua classe original de gravidade. Da mesma forma que na variação de 20%, a variação de -20% não é suficiente para mover significativamente valores de uma classe para outra, confirmando que as classes são pouco sensíveis às mudanças percentuais nos pesos dos critérios.

Tabela 23 - Transição de classes (km²) para uma variação de -20% em relação aos pesos base

Gravidade	Muito Baixa	Baixa	Média	Alta	Muito Alta	TOTAL
Muito Baixa	17.006,88	5.164,58	244,47	15,49	0,3	22.431,72
Baixa	805,79	43.515,72	6.655,32	261,55	45,44	51.283,82
Média	22,99	825,49	36.286,80	4.783,70	82,62	42.001,60
Alta	11,57	84,89	701,24	21.367,34	605,7	22.770,74
Muito Alta	0,49	23,89	118,22	1.028,53	9.106,31	10.277,44
TOTAL	17.848,48	49.614,95	44.010,06	27.457,78	9.843,14	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em comparação com o aumento de 20%, as transições apresentaram um comportamento distinto. As maiores transições ocorreram da classe “Baixa” para “Média” (6.655,32 km²), seguida pela transição de “Muito Baixa” para “Baixa” (5.164,58 km²) e “Média” para “Alta” (4.783,70 km²). Isso mostra que a direção das mudanças ocorre para os níveis imediatamente superiores, comportamento contrário ao aumento de 20%, cujas classes transitaram para os níveis imediatamente inferiores. A exceção é a classe “Muito Alta” que transita para a classe imediatamente inferior tanto com a variação negativa como com a positiva.

As classes relacionadas aos extremos (“Muito Baixa” e “Muito Alta”) mantiveram a tendência de estabilidade em relação às demais classes, apesar das transições ocorridas entre as classes “Muito Baixa” para “Baixa” (5.164,58 km²) e “Muito Alta” para “Alta” (1.028,53 km²).

Do ponto de vista a aplicação de multas ambientais, a tomada de decisão quanto à alteração dos pesos deve ser orientada no sentido de observar a repercussão nos valores das multas, já que gravidades mais baixas reduzem as sanções e as mais altas, aumentam, pois o valor da multa depende da gravidade da infração.

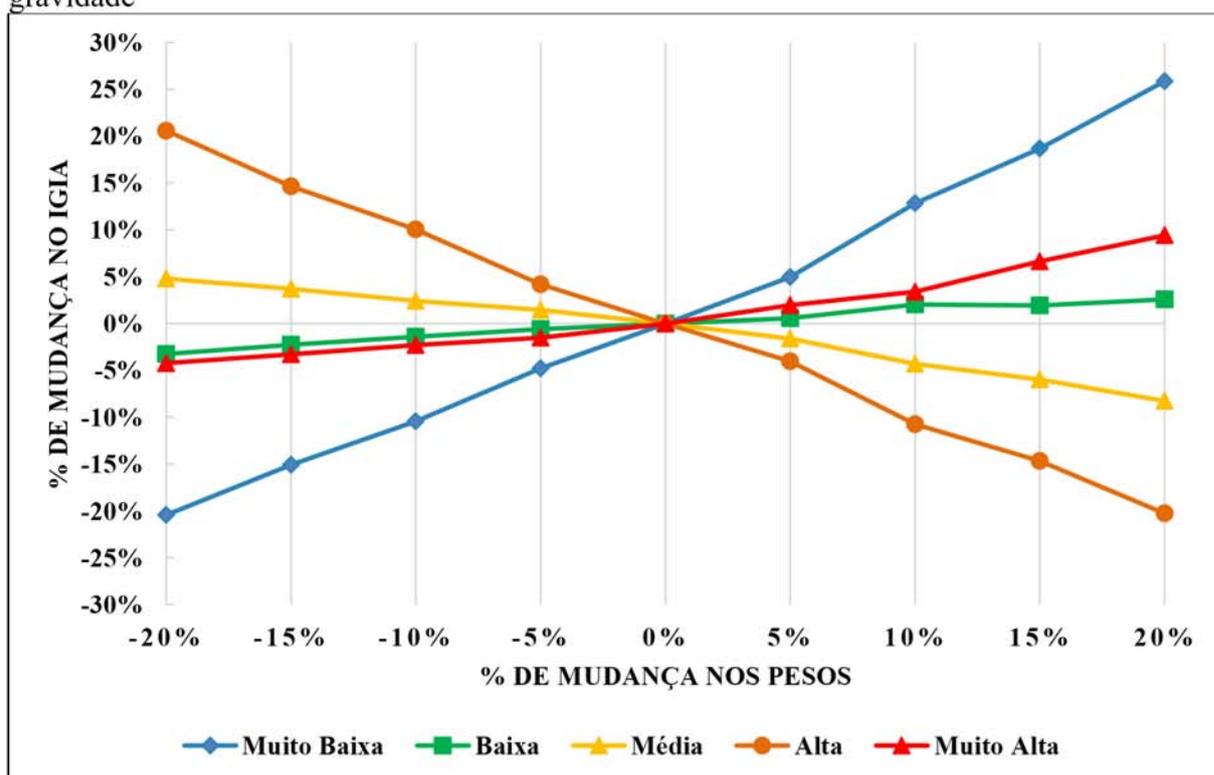
O aumento do peso do critério Uso e Cobertura da Terra resulta em redução da gravidade da infração ambiental, ou seja, aumento da classe de gravidade “Muito Baixa”, em

função de a predominância de classes de uso com tendência a degradação ambiental (pastagens e agricultura), além de classes de cobertura vegetal pouco densas e consequente maior vulnerabilidade ambiental (Formação Savânica).

O gráfico da Figura 22 mostra o comportamento das mudanças nas classes de gravidade (eixo Y) em função da variação percentual nos pesos (eixo X) de maneira que uma variação percentual positiva tende a valorizar as classes “Muito Baixa”, “Baixa” e “Muito Alta”. Uma variação negativa tende a valorizar as classes “Média” e “Alta”. As variações, portanto, impactam as classes de forma diferente, o que reflete o impacto cumulativo das transições.

A estrutura global mostra uma estabilidade nas classes de gravidade com as variações de -20% e +20%, porém com diferenças importantes na maneira como cada variação afeta as transições.

Figura 22 - Sensibilidade da variação dos pesos dos critérios e mudanças nas classes de gravidade



Fonte: Elaborado pelo autor.

As classes “Muito Baixa” e “Muito Alta” aumentam ou diminuem proporcionalmente à variação dos pesos, assim como a classe “Baixa”, porém esta apresenta uma maior estabilidade em relação às variações nos pesos. A classe “Média” e “Alta” comportam-se de forma inversamente proporcional à variação dos pesos, reduzindo à medida que os pesos aumentam e vice-versa.

4.6 Modelo de cálculo da multa

Os procedimentos executados nas etapas 3.3 a 3.6 referem-se à estruturação do modelo espacial da gravidade da infração ambiental, aqui denominada Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA, simbolizada por g_{IGIA} .

Para o cálculo da multa ambiental, foi proposto o modelo mostrado na Equação 25, seção 3.2, que possui como entrada as seguintes variáveis:

- M_i : valor do limite inferior da multa ambiental, a multa mínima;
- p : Potencial Poluidor-Degradador – PPD da atividade;
- g : Gravidade da Infração Ambiental na coordenada do pixel.

Na Tabela 24 estão listadas as infrações por tipo, bem como discriminados os artigos que tipificam as condutas, seus valores de multa mínimos e máximos, bem como os valores de gravidade máxima associados à infração, calculada com base na Equação 29, tomando-se como base o Decreto Federal 6.514, de 22 de julho de 2008, que regulamenta a Lei de Crimes Ambientais no Brasil (BRASIL, 1998).

Tabela 24 - Tipos de infração, artigos, valores de multas (em R\$) e g_{max}

TIPO DE INFRAÇÃO	ARTIGO	MULTA MÍNIMA	MULTA MÁXIMA	GMAX
Fauna	29	500,00	3.000,00	1,792
	31	500,00	5.000,00	2,303
	32	200,00	10.000,00	3,912
	33	5.000,00	500.000,00	4,605
	34	5.000,00	500.000,00	4,605
	35	700,00	10.000,00	2,659
	36	700,00	100.000,00	4,962
	37	300,00	10.000,00	3,507
	38	3.000,00	50.000,00	2,813
	39	500,00	50.000,00	4,605
Flora	43	5.000,00	50.000,00	2,303
	44	5.000,00	20.000,00	1,386
	45	5.000,00	50.000,00	2,303
	55	50,00	500,00	2,303
	56	100,00	1.000,00	2,303
	59	1.000,00	10.000,00	2,303
Poluição e outras	61	5.000,00	50.000.000,00	9,210
	63	1.500,00	3.000,00	0,693
	64	500,00	2.000.000,00	8,294
	65	100.000,00	1.000.000,00	2,303
	66	500,00	10.000.000,00	9,903
	67	5.000,00	5.000.000,00	6,908

				Continua...
	68	1.000,00	10.000,00	2,303
	69	1.000,00	10.000.000,00	9,210
	71	500,00	10.000,00	2,996
Ordenamento Urbano e o Patrimônio Cultural	72	10.000,00	500.000,00	3,912
	73	10.000,00	200.000,00	2,996
	74	10.000,00	100.000,00	2,303
	75	1.000,00	50.000,00	3,912
	77	500,00	100.000,00	5,298
Infrações Administrativas Contra a Administração Ambiental	78	100,00	300,00	1,099
	79	10.000,00	1.000.000,00	4,605
	80	1.000,00	1.000.000,00	6,908
	81	1.000,00	100.000,00	4,605
	82	1.500,00	1.000.000,00	6,502
	83	10.000,00	1.000.000,00	4,605
Unidades de Conservação	84	2.000,00	100.000,00	3,912
	85	1.500,00	1.000.000,00	6,502
	86	500,00	10.000,00	2,996
	87	1.500,00	100.000,00	4,200
	88	5.000,00	2.000.000,00	5,991
	89	1.500,00	1.000.000,00	6,502
	90	500,00	10.000,00	2,996
	91	200,00	100.000,00	6,215
	92	1.000,00	10.000,00	2,303

Fonte: Elaborado pelo autor.

A legislação brasileira estabelece que o agente autuante, ao lavrar o auto de infração, também deverá considerar a situação econômica do infrator. Assim, a multa calculada deve levar em conta a referida condição. Para isto, foi proposto como regra para consideração da capacidade econômica a segmentação da amplitude do valor da multa em intervalos, tomando-se como base a seguinte classificação mostrada no Quadro 7:

Quadro 7 - Classificação dos portes das empresas e forma de cálculo do teto da multa ambiental

Classificação	Pessoa física ou jurídica com patrimônio ou receita anual bruta (C)	Teto (T) da multa máxima (M)	Cálculo
Microempresa	≤ R\$ 360.000,00	Até 20% da multa máxima prevista no artigo somada ao capital social	$T=M \times 0,20$
Pequeno Porte	R\$ 360.000,00 > e ≤ R\$ 3.600.000,00	Até 40% da multa máxima prevista no artigo somada ao capital social	$T=M \times 0,40$
Médio Porte	R\$ 3.600.000,00 > e ≤ R\$ 12.000.000,00	Até 60% da multa máxima prevista no artigo somada ao capital social	$T=M \times 0,60$
Grande Porte	> R\$ 12.000.000,00	Teto da multa máxima.	$T=M$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A classificação das empresas por portes baseia-se na legislação vigente. No presente trabalho, foi proposta a definição de um teto para a multa ambiental segundo a capacidade econômica do infrator, garantindo que empresas na mesma faixa de classificação recebam multas proporcionais à sua capacidade de pagamento.

Para exemplificar a aplicação, propõe-se o seguinte cenário: no setor de Indústria de Curtume e Tratamento de Couros e Peles, ocorre uma infração consistindo no descarte de efluentes sem tratamento prévio, enquadrando-se no Artigo 61 do Decreto Federal 6.514/2008. A multa mínima aplicável é de R\$ 5.000,00, enquanto a máxima pode chegar a R\$ 50.000.000,00. O capital social da empresa é de R\$ 256.000,00. Esta atividade é classificada como PPD Alto (Tabela 3). A localização exata da infração é identificada pelas coordenadas 454029 E | 9200464 N, e o índice de gravidade da infração na coordenada informada é 0,452.

Considerando que a empresa possui capital social de R\$ 256.000,00, portanto classificada como microempresa, o teto da multa (multa máxima) é calculado como $T=50.000.000 \times 0,20$ (Quadro 7), que resulta em R\$ 10.000.000,00. Esse é o valor máximo que a multa poderá assumir. Em seguida, por meio da equação 29, tem-se que o $g_{m\acute{a}x} = 7,60$. O valor de $g_{IGIA} = 0,452$. O valor de $g = g_{m\acute{a}x} * g_{IGIA} = 3,44$. Aplicando-se a equação 25, tem-se que o valor da multa $M = 5.000 * e^{1*3,41}$, que resulta em R\$ 155.251,41.

Para implementação do modelo proposto, foi criada uma ferramenta computacional baseada em linguagem *Python*, denominada Calculadora de Multa Ambiental (Figura 23), que permite ao agente fiscalizador calcular o valor da multa ambiental, a partir do par de coordenadas em sua localização real e conhecimento das variáveis *capital social*, *tipologia da infração* e *Potencial Poluidor-Degradador – PPD*. Foram utilizadas as equações 25 e 29, tendo como base o que foi apresentado no item 3.2.

Figura 23 - Interface da Calculadora de Multa Ambiental

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para calcular o valor da multa com base na ferramenta desenvolvida, devem ser seguidos os seguintes passos:

- Localizar a gravidade g_{IGIA} para $g_i(x)$; por meio do lançamento do par de coordenadas X, Y formato UTM;
- Definir o teto da multa com base na capacidade de pagamento no campo *Capital Social*, aqui definida como Capital Social, segundo os cálculos do Quadro 6;
- Definir a tipificação da conduta infracional. Isso permitirá que o sistema localize os valores máximo e mínimo da infração de acordo com a capacidade econômica, gerando a variável $g_{máx}$;
- Definição do potencial poluidor-degradador da atividade, que funcionará como um modulador do valor da multa a ser aplicada.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Neste trabalho estudou-se a gravidade da infração ambiental como suporte ao cálculo de multas ambientais, sob a perspectiva do apoio multicritério à decisão e análise espacial, através da estruturação de uma metodologia de cálculo da multa ambiental que resultou no Índice de Gravidade da Infração Ambiental – IGIA como variável para o modelo de cálculo de multa.

Em problemas espaciais, os valores dos critérios e as preferências dos decisores são as principais fontes de incertezas. Nesse sentido, é possível afirmar que as combinações metodológicas aplicadas foram ao encontro dessas características, a partir da abordagem *fuzzy* dos métodos Delphi, para seleção dos critérios, e AHP (*Analytic Hierarchy Process*) na ponderação desses critérios. A abordagem *fuzzy* compensa a imprecisão e incerteza nos julgamentos existente no AHP. O uso de números *fuzzy* triangulares permitiu um melhor tratamento das incertezas e indefinições inerentes ao método.

A principal contribuição do estudo foi propor uma abordagem objetiva para a atuação dos órgãos de controle ambiental no exercício da aplicação de multas ambientais em campo, por meio de uma metodologia que leva em conta as características do ambiente, por meio dos critérios selecionados, bem como a capacidade de pagamento e do Potencial Poluidor-Degradador que está relacionado aos aspectos ambientais da atividade.

Além disso, a metodologia proposta permitiu a distribuição espacial da gravidade da infração ambiental por todo o território do estado do Ceará, por meio de um mapa temático, onde cada *pixel* representa um valor de gravidade da infração ambiental.

A metodologia também apresenta como vantagem a manutenção de bancos de dados em ambiente SIG permitindo a constante atualização de informações com maior rapidez e precisão na estimativa *in loco* das condições necessárias para aplicação da multa ambiental, além de funcionar como uma ferramenta de monitoramento da evolução das condições ambientais, já que transições para classes de gravidade mais altas indicam melhoria nas condições ambientais nas áreas.

Os resultados encontrados apontam que a maior parte da área estudada apresenta gravidade baixa a média, juntas respondendo por 62,70% de todo o estado, condição fortemente influenciada pelas tipologias de uso e cobertura, pois este é o critério com maior importância, além de ser aquele com maior capacidade de alteração da qualidade ambiental. A declividade

também foi um critério importante, em razão de áreas mais planas tenderem a ser prioritárias para usos agrícolas. Nessas áreas, juntamente com as de classe “Muito Baixa” as multas ambientais tendem a ser menores.

As áreas que apresentaram melhores condições ambientais e, conseqüentemente, valores de multas mais altos, apresentando apenas vegetação como classe de cobertura, foram aquelas classificadas como de gravidade alta a muito alta, somando 22,22% da área estudada. Essas áreas apresentam declividades mais acentuadas, o que as torna menos aptas à agricultura e pecuária.

O critério Uso e Cobertura da Terra, que apresentou o maior peso entre os critérios, possui influência preponderante na gravidade da infração ambiental, na medida em que se trata de uma variável dinâmica e cujas classes de uso e cobertura influenciam na qualidade ambiental. Do ponto de vista da aplicação de multas ambientais, ambientes muito degradados perdem seu valor ambiental, da mesma forma que ambientes conservados aumentam seu valor ambiental, o que pode ser verificado nos valores de gravidade em áreas com classes de cobertura conservadas em comparação com aquelas parcial ou totalmente antropizadas.

Diante do exposto, entende-se que os objetivos propostos neste trabalho foram alcançados, tendo sido desenvolvido um modelo de cálculo de multa ambiental que levou em conta a gravidade da infração ambiental e o potencial poluidor-degradador da atividade, bem como a capacidade de pagamento, por meio da definição dos critérios relevantes na composição do índice de gravidade, estruturado por meio dos seus níveis de importância, através da análise multicritério aliada a métodos e técnicas de análise espacial. Com isso, por meio da modelagem matemática proposta, foi possível estruturar a metodologia para cálculo da multa ambiental.

Almeja-se com este trabalho que, aplicações futuras da metodologia, possam testar sua consistência em operação, permitindo sua avaliação e melhoria contínua.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- I) Incorporação de outras variáveis ambientais, sociais e econômicas que possam contribuir para uma melhor estimativa da gravidade da infração ambiental;
- II) Atualização periódica com espaço temporal sensível à detecção de mudanças significativas no uso e cobertura da terra;
- III) Desenvolvimento de metodologia de estimativa do PPD das atividades de acordo com as suas características específicas.

REFERÊNCIAS

- ABDULLAH, L. Developing a Decision on the Type of Prostate Cancer Using FAHP. *In: Fuzzy Analytic Hierarchy Process*, Boca Raton, v. 1, p. 249-295, 2017.
- AJIBADE, F. O. *et al.* Combining multicriteria decision analysis with GIS for suitably siting landfills in a Nigerian state. *Environmental and sustainability indicators*, [s. l.], v. 3, p. 100010–100010, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100010>.
- ALI, S. A. *et al.* GIS-based comparative assessment of flood susceptibility mapping using hybrid multi-criteria decision-making approach, naïve Bayes tree, bivariate statistics and logistic regression: A case of Topľa basin, Slovakia. *Ecological Indicators*, [s. l.], v. 117, p. 106620–106620, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106620>.
- ALINEZHAD, A.; KHALILI, J. **New methods and applications in multiple attribute decision making (MADM)**. Cham, Switzerland: Springer, 2019.
- ALKAN, N.; KAHRAMAN, C. An intuitionistic fuzzy multi-distance-based evaluation for aggregated dynamic decision analysis (IF-DEVADA): Its application to waste disposal location selection, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, [s. l.], v. 111, p. 104809, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.104809>.
- ALLAFTA, H.; OPP, C. GIS-based multi-criteria analysis for flood prone areas mapping in the trans-boundary Shatt Al-Arab basin, Iraq-Iran. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 2087-2116, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/19475705.2021.1955755>.
- ALMEIDA, D.; SANTOS, M. D.; COSTA, A. F. B. Aplicação do coeficiente alfa de cronbach nos resultados de um questionário para avaliação de desempenho da saúde pública. **XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção**, Associação Brasileira de Engenharia de Produção São Paulo, v. 15, p. 1–12, 2010.
- ALMEIDA, F. C. *et al.* Análise multicritério na definição de áreas prioritárias para recuperação florestal na bacia do rio doce, em minas gerais. *Nativa*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 81–90, 2020. DOI: <https://doi.org/10.31413/nativa.v8i1.8130>.
- ALVES, F. L. F.; FRANÇA, L. G. Fiscalização Ambiental no Federalismo Brasileiro de Cooperação: A aplicação da Lei Complementar nº 140/2011. *Revista de Direito*, [s. l.], v. 12, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.32361/2020120210178>.
- ALYAMANI, R.; LONG, S. The Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process in Sustainable Project Selection. *Sustainability*, [s. l.], v. 12, n. 20, p. 8314, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12208314>.
- ALYAMANI, R.; LONG, S.; NURUNNABI, M. Evaluating Decision Making in Sustainable Project Selection Between Literature and Practice. *Sustainability*, [s. l.], v. 13, n. 15, p. 8216, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13158216>.
- AMADO, F. **Direito Ambiental**. 5. ed. rev. e atualiz. Salvador: Ed. Jus Podium, 2017.
- ANDRADE, D. C. Economia e meio ambiente: aspectos teóricos e metodológicos nas visões

neoclássica e da economia ecológica. **Leituras de Economia Política**, Campinas, v. 14, p. 1-31, 2008.

ANTONELLO, S. L. **Um sistema de planejamento e gestão para bacias hidrográficas com uso de análise multicritérios**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ANTUNES, P. B. **Direito Ambiental**. 12. ed. rev., ampl. e atualiz. Rio de Janeiro: Lumen Juris, 2010.

ARABAMERI, A. et al. Application of Probabilistic and Machine Learning Models for Groundwater Potentiality Mapping in Damghan Sedimentary Plain, Iran. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 11, n. 24, p. 3015, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs11243015>.

BALUSA, B. C.; GORAI, A. K. Sensitivity analysis of fuzzy-analytic hierarchical process (FAHP) decision-making model in selection of underground metal mining method. **Journal of Sustainable Mining**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 8-17, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.10.003>.

BARAN-ZGŁOBICKA, B.; GODZISZEWSKA, D.; ZGŁOBICKI, W. The Flash Floods Risk in the Local Spatial Planning (Case Study: lublin upland, e poland). **Resources**, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 14, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/resources10020014>.

BARBER, C. P. et al. Roads, deforestation, and the mitigating effect of protected areas in the Amazon. **Biological Conservation**, [s. l.], v. 177, p. 203-209, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.07.004>.

BARZEHKAR, M. et al. Landfill site selection using GIS-based multi-criteria evaluation (case study: SaharKhiz Region located in Gilan Province in Iran). **SN applied sciences**, [s. l.], v. 1, n. 9, p. 1-11, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1109-9>.

BASAN, E. et al. A Data Normalization Technique for Detecting Cyber Attacks on UAVs. **Drones**, [s. l.], v. 6, n. 9, p. 245, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/drones6090245>.

BERTALANFFY, L. V. **Teoria Geral dos Sistemas**. Petrópolis: Vozes, 5ed. 351 p. 1977.

BHADLAN, A. et al. A GIS based Fuzzy-AHP for delineating groundwater potential zones in tropical river basin, southern part of India. **Geosystems and Geoenvironment**, [s. l.], v. 1, n. 4, p. 100093, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100093>.

BOLSTAD, P. **GIS Fundamentals: A First Text on Geographic Information Systems**. Eider Press. 784p. 2016.

BORGES, K. A. V.; DAVIS, C. A.; LAENDER, A. H. F. OMT-G: An object-oriented data model for geographic applications. **Geoinformatica**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 221. 2001.

BORROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press. 1998. 360p.

BRANDÃO, R. L.; FREITAS, L. C. B. (org.). **Geodiversidade do estado do Ceará**.

Programa Geologia do Brasil. Levantamento da geodiversidade. Fortaleza: CPRM, 2014. 216p. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16726>. Acesso em: 10 mar. 2022.

BRANDLI, E. N. et al. Análise das vantagens e limitações dos métodos de valoração de recursos ambientais: Método do custo de viagem, método de valoração contingente e método de preços hedônicos. *In: Simpósio de Engenharia de Produção, SIMPEP*, p. 13, 2006. *Anais...*Bauru, SP: Unesp, 2006.

BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.

BRASIL. Decreto Federal nº 6.514, de 22 de julho de 2008. Dispõe sobre as infrações e sanções administrativas ao meio ambiente, estabelece o processo administrativo federal para apuração destas infrações, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 2008.

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. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/12651.htm. Acesso em: 10 mar. 2022.

BRASIL. **Lei nº 5.172, de 25 de outubro de 1966**. Dispõe sobre o Sistema Tributário Nacional e institui normas gerais de direito tributário aplicáveis à União, Estados e Municípios. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1966.

BRASIL. **Lei Nº 6.938, de 31 de agosto de 1981**. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Brasília, DF, ago 1981. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/16938.htm. Acesso em: 10 nov. 2021.

BRASIL. **Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998**. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Brasília, DF: Diário Oficial da União, 1998.

BRITO, J. L. S. de; ROSA, R. Introdução aos sistemas de informação geográfica. **Sociedade & Natureza**, [s. l.], v. 6, n. 11/12, 1994. DOI: <https://doi.org/10.14393/SN-v6-1994-60986>. [s. l.],

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford University Press, Oxford, 333 p. 1998.

CALABRESE, A. et al. Integrating sustainability into strategic decision-making: A fuzzy AHP method for the selection of relevant sustainability issues. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 139, p. 155-168, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.005>.

CÂMARA, G. et al. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos, INPE,

2001 (on-line, 2a. edição, revista e ampliada). Disponível em:

<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>. Acesso em: 03 set. 2021.

CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em geoprocessamento. **In: Sistemas de Informações Geográficas (Aplicações na Agricultura)**. 2.ed. Brasília: SPI/ EMBRAPA-CPAC, 434 p. 1998.

CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. Conceitos básicos da ciência da geoinformação. **In: Introdução a ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/papers/epistemologia.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2022.

CARTER, B.; RINNER, C. Locally weighted linear combination in a vector geographic information system. **J Geogr Syst**, [s. l.], v. 16, p. 343–361, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10109-013-0194-3>.

CARVALHO FILHO, J. dos S. Manual de Direito Administrativo. Rio de Janeiro: Editora Lumen Juris, 2008.

CARVALHO, D. W. **Dano Ambiental Futuro: a responsabilização civil pelo risco ambiental**. 2. ed. rev., ampl. e atualiz. Porto Alegre: Livraria do Advogado Editora, 2013.

CAVALCANTE, D. L.; PIACENTI, C. A.; OLIVEIRA, M. L. Uma aplicação do método de preços hedônico no mercado imobiliário em duas zonas urbanas do oeste paranaense. **Revista Brasileira de Planejamento e Desenvolvimento**, Curitiba, v. 11, n. 2, p. 288-307, 2022. DOI: [10.3895/rbpd.v11n2.13827](https://doi.org/10.3895/rbpd.v11n2.13827).

CEARÁ. Conselho Estadual de Meio Ambiente. **Resolução nº 02, de 11 de abril de 2019**. Dispõe sobre os procedimentos, critérios, parâmetros e custos aplicados aos processos de licenciamento e autorização ambiental no âmbito da Superintendência Estadual do Meio Ambiente – SEMACE. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/46/2019/05/Resolucao-COEMA-02-de-2019.pdf>. Acesso em: 03 set. 2021.

CELIKYILMAZ, A.; TÜRKSEN, I. B. **Modeling Uncertainty with Fuzzy Logic with Recent Theory and Applications**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 443 p. 2009. DOI: [10.1007/978-3-540-89924-2](https://doi.org/10.1007/978-3-540-89924-2).

ÇETINKAYA, C. et al. GIS-based fuzzy MCDA approach for siting refugee camp: A case study for southeastern Turkey, **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 18, p. 218-231, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.07.004>.

CHAKHAR, S.; MOUSSEAU, V. **Spatial Multicriteria Decision Making**. **In: Shekhar, S., Xiong, H. (eds) Encyclopedia of GIS**. Springer, Boston, MA. 2008.

CHANG, K. **Introduction to Geographic Information Systems**. New York: McGraw-Hill Education. 9th ed. 461p. 2018.

CHANG, T. H.; WANG, T. C. Using the fuzzy multi-criteria decision-making approach for measuring the possibility of successful knowledge management. **Information Sciences**, [s. l.], v. 179, n. 4, p. 355-370, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.10.012>.

CHEN, Y.; YU, J.; KHAN, S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation, **Environmental Modelling & Software**, [s. l.], v. 25, n. 12, p. 1582-1591, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.06.001>.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 240p. 1999.

CORTINA, J. M. What Is Coefficient Alpha? An Examination of Theory and Applications. **Journal of Applied Psychology**, [s. l.], v. 78, n. 1, p. 98-104, 1993. DOI: <https://doi.org/10.1037/0021-9010.78.1.98>.

CREPANI, E. et al. **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento EcológicoEconômico e ao ordenamento territorial**. INPE. São José dos Campos. São Paulo. 2001. Disponível em: <http://sap.ccst.inpe.br/artigos/CrepaneEtAl.pdf>. Acessado em: 10 abr. 2022.

DE BY, R. A.; HUISMAN, O. **Principles of Geographic Information Systems: An Introductory Textobook**. The International Institute for Geo-information Science and Earth Observation. 2001.

DEMARCHI, J. C.; PISANI, R. J.; ZIMBACK, C. L. Análise da Vulnerabilidade à Erosão da Sub-Bacia do Ribeirão das Perobas por meio de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. **Revista Geografia e Pesquisa**, Ourinhos, v. 7, n. 1, 2013.

DEMERS, M. N. **GIS For Dummies**. Wiley Publishing. 388p. 2009.

DENÈGRE, J. **Sémiologie et conception cartographique**. Hermes Science, Lavoisier. 274p. 2005.

DENT, B. D.; TORGUSON, J. S.; HODLER, T. W. **Cartography: thematic map design**. McGraw-Hill. 369p. 2009.

DILEKOGLU, M. F.; ASLAN, V. Determination of groundwater potential distribution of Ceylanpınar Plain (Turkey) in Upper Mesopotamia by using geographical information techniques and Fuzzy-AHP with MCDM. **Water Supply**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 372-390, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.2166/ws.2021.268>.

DROBNE, S.; LISEC, A. Multi-attribute decision analysis in GIS: Weighted linear combination and ordered weighted averaging. **Informatica**, [s. l.], n. 33, p. 459-474, 2009.

EASTMAN, J. R. et al. **GIS and decision making**. Geneva: UNITAR. 1993.

ELBOSHY, B. et al. A suitability mapping for the PV solar farms in Egypt based on GIS-AHP to optimize multi-criteria feasibility. **Ain Shams Engineering Journal**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. 101618–101618, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.013>.

EMOVON, I.; OGHENENYEROVWHO, O. S. Application of MCDM method in material selection for optimal design: A review. **Results in Materials**, [s. l.], v. 7, p. 100115, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2020.100115>.

EMROUZNEJAD, A.; HO, W. (org.) **Fuzzy Analytic Hierarchy Process**. Boca Raton: CRC Press, p. 249-295. 2017.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. **Dictionary of GIS Terminology**, H. Kennedy, (ed.), Redlands, CA: ESRI Press, 2001.

ESRI. **ArcGIS Pro: FuzzyLarge**. 2018. Disponível em: <http://pro.arcgis.com/en/pro-app/arcpy/spatial-analyst/fuzzylarge-class.html>. Acesso em: 15 jul. 2022.

FARIAS, T.; COUTINHO, F. S. N.; MELO, G. K. R. M. **Direito Ambiental**. 3ª ed. Salvador: Editora JusPODIVM, 2015.

FERNÁNDEZ, D.; LUTZ, M. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Eng Geol**, [s. l.], v. 111, n. 1–4, p. 90–98. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>.

FILDES, S. G. et al. Mapping groundwater potential zones using remote sensing and geographical information systems in a fractured rock setting, Southern Flinders Ranges, South Australia. **J Earth Syst Sci**, [s. l.], v. 129, p. 160, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12040-020-01420-1>.

FIORILLO, C. A. P. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro**. 14. ed. rev., ampl. e atual. em face da Rio+20 e do novo “Código” Florestal — São Paulo: Saraiva, 2013.

FIORILLO, C. A. P. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro**. 20ª ed. São Paulo: Saraiva Educação, 2020.

FISCHER, M.; SCHOLTEN, H. J.; UNWIN, D. **Spatial Analytical Perspectives on GIS. GisData4**. Taylor e Francis, 275p. 1998.

FORMAN, R. T. T.; DEBLINGER, R. D. The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 36-46, 2000. DOI: <http://www.jstor.org/stable/2641902>.

FUJITA, A. et al. Evaluating different methods of microarray data normalization. **BMC Bioinformatics**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1-11, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-469>.

GALATI, S. R. **Geographic Information Systems Demystified: A Self-Teaching Guide**. Artech House, 270p. 2006.

GARCIA, L. M.; THOMÉ, R. **Direito Ambiental**. 9ª ed. Salvador: Editora JusPODIVM, 2016.

GHASEMI, G. et al. Theoretical and technical potential evaluation of solar power generation in Iran. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 138, p. 1250–1261, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.068>.

GHOSH, S. et al. Impact of COVID-19 Induced Lockdown on Environmental Quality in Four

- Indian Megacities Using Landsat 8 OLI and TIRS-Derived Data and Mamdani. Fuzzy Logic Modelling Approach. *Sustainability*, [s. l.], v. 12, n. 13, p. 5464–5464, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12135464>.
- GHOUSHCHI, S. J. et al. Landfill Site Selection for Medical Waste Using an Integrated SWARA-WASPAS Framework Based on Spherical Fuzzy Set. *Sustainability*, [s. l.], v. 13, n. 24, p. 13950–13950, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132413950>.
- GIBSON, R. B. Sustainability assessment: basic components of a practical approach. *Impact Assessment and Project Appraisal*, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 170-182, 2006. DOI: <https://doi.org/10.3152/147154606781765147>.
- GIGOVIĆ, L. et al. Application of GIS-interval rough AHP methodology for flood hazard mapping in urban areas. *Water*, [s. l.], v. 9, n. 6, p. 360, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/w9060360>.
- GIGOVIĆ, L. et al. GIS-Fuzzy DEMATEL MCDA model for the evaluation of the sites for ecotourism development: A case study of “Dunavski ključ” region, Serbia. *Land Use Policy*, [s. l.], v. 58, p. 348-365, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.07.030>.
- GOMES, F. L.; MACIEL, S. **Lei de Crimes Ambientais: comentários à Lei 9.605/1998**. 2. ed. rev., atual. E ampl., – Rio de Janeiro: Forense; São Paulo: MÉTODO, 2015.
- GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S.; ALMEIDA, A. T. **Tomada de decisão gerencial – enfoque multicritério**. São Paulo: Atlas, 2002.
- GOODCHILD, M. F. **Geographical data modeling**. *Computers Geosciences*, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 401. 1992.
- GOOSEM, M. Fragmentation impacts caused by roads through rainforests. *Current Science*, [s. l.], v. 93, n. 11, p. 1587–1595, 2007. DOI: <http://www.jstor.org/stable/24099089>.
- GRANZIERA, M. L. M. **Direito ambiental**. 5. ed., rev. e atual. São Paulo, Foco, 2019.
- GREENE, R. et al. GIS-based multiple-criteria decision analysis. *Geography Compass*, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 412-432, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2011.00431.x>.
- GUL, M.; GUVEN, B.; GUNERI, A. F. A new Fine-Kinney-based risk assessment framework using FAHP-FVIKOR incorporation. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, [s. l.], v. 53, p. 3–16, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jlpi.2017.08.014>.
- GULUM, P.; AYYILDIZ, E.; GUMUS, A. T. A two level interval valued neutrosophic AHP integrated TOPSIS methodology for post-earthquake fire risk assessment: An application for Istanbul. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, [s. l.], v. 61, p. 102330, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102330>.
- HAGOS, Y. G. et al. Flood hazard assessment and mapping using GIS integrated with multi-criteria decision analysis in upper Awash River basin, Ethiopia. *Appl Water Sci*, [s. l.], v. 12, p. 148, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01674-8>.

- HARRIS, J.M.; ROACH, B. Environmental and Natural Resource Economics: A Contemporary Approach. 4TH ed. New York: Routledge, 2017.
- HASHEMINASAB, H. et al. The Role of Façade Materials in Blast-Resistant Buildings: An Evaluation Based on Fuzzy Delphi and Fuzzy EDAS. **Algorithms**, [s. l.], v. 12, p. 119, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/a12060119>.
- HEYWOOD, I.; CORNELIUS, S.; CARVER, S. An Introduction to Geographical Information Systems. Pearson Prentice Hall, 2006. 3rd ed. 426p.
- HEZAM, I. M. et al. An Integrated Decision Support Framework Using Single-Valued Neutrosophic-MASWIP-COPRAS for Sustainability Assessment of Bioenergy Production Technologies. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 211, p. 118674, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118674>.
- HSIEH, T. Y.; LU, S. T.; TZENG, G. H. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. **International Journal of Project Management**, [s. l.], v. 22, n. 7, p. 573–584, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2004.01.002>.
- HSU, Y. L.; LEE, C. H.; KRENG, V. B. The application of Fuzzy Delphi Method and Fuzzy AHP in lubricant regenerative technology selection. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 419–425, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.10.003>.
- HUANG, B. **Comprehensive Geographic Information Systems**. 1st Edition. Elsevier, 1474 p. 2017.
- İNCEKARA, S. Do Geographic Information Systems (GIS) Move High School Geography Education Forward in Turkey? A Teacher's Perspective. **BM Alam**, [s. l.], p. 83-100, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/32851>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Geologia 1:250.000: Base de Dados Espacial 1:250.000, no recorte ao milionésimo**. Rio de Janeiro, RJ, 2018-2021. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/geologia/levantamento_geologico/vetores/escala_250_mil/. Acesso em: 02 fev. 2022.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pedologia 1:250.000: Base de Dados Espacial 1:250.000, no recorte ao milionésimo**. Rio de Janeiro, RJ, 2018-2021. Disponível em: https://geoftp.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/pedologia/vetores/escala_250_mil/. Acesso em: 02 fev. 2022.
- INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). **Modelo de valoração econômica dos impactos ambientais em unidades de conservação**. 2002. Disponível em: <https://www.terrabilis.org.br/ecotecadigital/pdf/modelo-de-valoracao-economica-dos-impactos-ambientais-em-unidades-de-conservacao.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Ceará em mapas**. Fortaleza: IPECE, 2007. Disponível em: <http://www2.ipece.ce.gov.br/atlas/capitulo1/12/129x.htm>. Acesso: 15 dez. 2022.

ISHIZAKA, A.; NEMERY, P.; LIDOUH, K. Location selection for the construction of a casino in the Greater London region: A triple multi-criteria approach. **Tourism Management**, [s. l.], v. 34, p. 211–220, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2012.05.003>.

JANKOWSKI, P.; LIGMANN-ZIELINSKA, A.; SWOBODZINSKI, M. Choice modeler: A web-based spatial multiple criteria evaluation tool. **Transactions in GIS**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 541–561, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2008.01111.x>.

JIANG, H.; EASTMAN, R. J. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. **International Journal of Geographical Information Science**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 173–184, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1080/136588100240903>.

JIANG, Q. et al. Two-scale decomposition-based multifocus image fusion framework combined with image morphology and Fuzzy Set Theory. **Information Sciences**, [s. l.], v. 541, p. 442–474, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.06.053>.

KANNAN, D.; JABBOUR, A. B. L. DE S.; JABBOUR, C. J. C. Selecting green suppliers based on GSCM practices: Using fuzzy TOPSIS applied to a Brazilian electronics company. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], v. 233, n. 2, p. 432–447, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.07.023>.

KANOKPHANVANICH, C.; RATTANAWONG, W.; VONGMANEE, V. A New Model for a Sustainable Healthcare Supply Chain Prioritizes Patient Safety: Using the Fuzzy Delphi Method to Identify Healthcare Workers' Perspectives. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, p. 7123, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15097123>.

KAR, A. K. A hybrid group decision support system for supplier selection using analytic hierarchy process, fuzzy set theory and neural network, **Journal of Computational Science**, [s. l.], v. 6, p. 23–33, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2014.11.002>.

KAR, A. K. Revisiting the supplier selection problem: An integrated approach for group decision support, **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 41, n. 6, p. 2762–2771, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.10.009>.

KAYACAN, E.; KHANESAR, M. A. **Fundamentals of Type-1 Fuzzy Logic Theory. Fuzzy Neural Networks for Real Time Control Applications**, [s. l.], p. 13–24, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802687-8.00002-5>.

KENNEDY, M. D. **Introducing Geographic Information Systems with ArcGIS: A Workbook Approach to Learning GIS**. Wiley, 3rd edition. 672p. 2013.

KONECNY, G. **Geoinformation Remote Sensing, Photogrammetry, and Geographic Information Systems**. CRC Press Taylor & Francis Group. 2nd. Ed..452p. 2014.

KROHLING, R. A.; SOUZA, T. T. M. Combining prospect theory and fuzzy numbers to multi-criteria decision making, **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 39, n. 13, p. 11487-11493, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.04.006>.

KUMAR, M. et al. Indicator-based vulnerability assessment of forest ecosystem in the Indian Western Himalayas: An analytical hierarchy process integrated approach. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 125, p. 107568–107568, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107568>.

KUO, Y. F.; CHEN, P. C. Constructing performance appraisal indicators for mobility of the service industries using Fuzzy Delphi Method. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 35, n. 4, p. 1930–1939, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2007.08.068>.

KWAK, Y.; DEAL, B.; HEAVISIDES, T. A large scale multi criteria suitability analysis for identifying solar development potential: a decision support approach for the state of Illinois, USA. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 177, p. 554–567, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.165>.

Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG). **Chave de Interpretação MapBiomás (2021)**. Iesa.ufg.br. Disponível em: <https://chave.lapig.iesa.ufg.br/pt/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

LEITE, F. D. P.; ALMEIDA, J. R. Valoração econômica do recurso e do dano ambiental aplicada à quantificação de débito imputado pelo Tribunal de Contas da União. **Revista do TCU**, jul/set 2005.

LEITE, J. R. M. **Dano Ambiental: do individual ao coletivo extrapatrimonial**. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 1999.

LEONTITSIS, A.; PAGGE, J. A simulation approach on Cronbach's alpha statistical significance. **Mathematics and Computers in Simulation**, [s. l.], v. 73, n. 5, p. 336–340, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2006.08.001>.

LIGMANN-ZIELINSKA, A.; JANKOWSKI, P. Impact of proximity-adjusted preferences on rank-order stability in geographical multicriteria decision analysis. **Journal of Geographical Systems**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 167–187, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10109-010-0140-6>.

LIMA, L. C.; MORAIS, J. O.; SOUZA, M. J. N. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: FUNECE, 2000.

LIN, M. H. et al. Sustainable development in technological and vocational higher education: balanced scorecard measures with uncertainty. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 120, p. 1–12, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.054>.

LIU, Y.; ECKERT, C. M.; EARL, C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements, **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 161, p. 113738, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738>.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. W. **Geographic Information Systems and Science**. John Wiley & Sons, 517p. 2005.

LYU, H. et al. Risk assessment of mega-city infrastructures related to land subsidence using improved trapezoidal FAHP, **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 717, p. 135310, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135310>.

RAHMAN, M. A. et al. A new spatial multi-criteria decision support tool for site selection for implementation of managed aquifer recharge. **Journal of environmental management**, [s. l.], v. 99, p. 61-75, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.003>.

MAGALHÃES, I. A. L. et al. Análise de métodos de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na região Norte do estado do Espírito Santo, Brasil. **Anais, XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 5651-5657, 2013.

MALCZEWSKI, J. **GIS e Multicriteria Decision Analysis**. First. [s. l.]: John Wiley Sons, 1999.

MALCZEWSKI, J. GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. **Progress in Planning**, [s. l.], v. 62, n. 1, p. 3-65, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.progress.2003.09.002>.

MALCZEWSKI, J. Integrating multicriteria analysis and geographic information systems: the ordered weighted averaging (OWA) approach. **International Journal Environmental Technology and Management**, [s. l.], v. 6, n. 1/2, p. 7-19, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJETM.2006.008251>.

MALCZEWSKI, J. Local Weighted Linear Combination: Local Weighted Linear Combination. **Transactions in GIS**, [s. l.], v. 15, p. 439–55, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2011.01275.x>.

MALCZEWSKI, J. On the Use of Weighted Linear Combination Method in GIS: Common and Best Practice Approaches. **Transactions in GIS**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 5–22, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1111/1467-9671.00035>.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science**. Springer Berlin Heidelberg, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74757-4>.

MAPBIOMAS. **Coleção 6 da série anual de mapas de cobertura e uso de solo do Brasil**. 2021. Disponível em: <http://mapbiomas.org>. Acesso em: 08 abr. 2022.

MARIA, J. L. **Diagnóstico da Fiscalização Ambiental de Agrotóxicos Ilegais no Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2019.

MATZENAUER, H. B. **Uma metodologia multicritério construtivista de avaliação de alternativas para o planejamento de recursos hídricos de bacias hidrográficas**. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

MELLO, J. C. C. B. S. et al. Conceitos básicos do apoio multicritério à decisão e sua aplicação no projeto Aerodesign. **Engevista**, Niterói, v. 5, n. 8, p. 22-35, 2003.

MENEZES, P. M. L.; FERNANDES, M. C. **Roteiro de Cartografia**. São Paulo: Oficina de Textos, 288p. 2013.

MILARÉ, E. **Direito do Ambiente**. 12^a ed. São Paulo: Editora Revista dos Tribunais, 2020.

MILARÉ, E. **Direito do ambiente: a gestão ambiental em foco. Doutrina. Jurisprudência. Glossário**. 6. ed. rev., ampl. e atual. São Paulo: RT, 2009.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO MATO GROSSO DO SUL (MPMS). **Nota técnica: orientações para valoração de dano ambiental em procedimentos do Ministério Público de Mato Grosso do Sul**. Centro de Apoio Operacional das Promotorias de Justiça do Meio Ambiente (CAOMA). Núcleo Ambiental. Março, 2018.

MIRANDA, R. C. R. O uso da informação na formulação de ações estratégicas pelas empresas. **Ciência da informação**, [s. l.], v. 28, p. 286-292, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-19651999000300006>.

MORADI, S. et al. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 29, p. 100478, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>.

MORAIS, R. C. S. **Contribuição metodológica para a elaboração do diagnóstico físico-conservacionista (DFC) em bacias hidrográficas: aplicação na Bacia do Alto Gurguéia, Piauí (Brasil)**. 151 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente), Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2018.

MOTA, S. **Planejamento Urbano e Preservação Ambiental**. Fortaleza. UFC. 242p. 1981.

MOTTA, R. S. **Manual para valoração econômica de recursos ambientais**. Rio de Janeiro: IPEA/MMA/PNUD/CNPq, 242p. 1997. Disponível em: <http://www.terrabrasilis.org.br/ecotecadigital/pdf/manual-para-valoracao-economica-de-recursos-ambientais.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

MUNIER, N.; HONTORIA, E.; JIMÉNEZ-SÁEZ, F. **Strategic Approach in Multi-Criteria Decision Making: A Practical Guide for Complex Scenarios**. Springer International Publishing, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-02726-1>.

MUNIZ, L. F. et al. Classificação climática para o Estado do Ceará utilizando distintos sistemas de caracterização. **In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS - SBRH, XXII.**, Florianópolis, Santa Catarina Brasil. Anais [...] Florianópolis, Santa Catarina, 2017.

MURRAY, T. J.; PIPINO, L. L.; VAN GIGER, J. P. A pilot study of fuzzy set modification of Delphi. **Human Systems Management**, [s. l.], v. 5, p. 76-80, 1985. DOI: [10.3233/HSM-1985-5111](https://doi.org/10.3233/HSM-1985-5111).

MUSSOI, F. L. R.; TEIVE, R. C. G. An integrated multicriteria decision-making approach for distribution system expansion planning. **International Journal of Intelligent Systems**, [s. l.], v. 36, n. 9, p. 4962–4989, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/int.22498>.

NASCIMENTO, R. L. X. et al. **Caderno de Caracterização Estado do Ceará**. Brasília, DF : Codevasf, 2022. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-do-rocha/publicacoes>. Acesso em: 15 out. 2022.

NEGRI NETO, A. Preços Hedônicos. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 33, n.12, 2003.

NGUYEN, P. H. A Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) Based on SERVQUAL for Hotel Service Quality Management: Evidence from Vietnam. **The Journal of Asian Finance, Economics and Business**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 1101–1109, 2021. DOI: <https://doi.org/10.13106/JAFEB.2021.VOL8.NO2.1101>.

OKOLI, C.; PAWLOWSKI, S. D. The Delphi method as a research tool: an example, design considerations and applications, **Information & Management**, [s. l.], v. 42, n. 1, p. 15-29, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.im.2003.11.002>.

OLAYA, V. **Introduction to GIS**. 2018. This book is distributed under a Creative Commons Attribution license. Disponível em: <https://volaya.github.io/gis-book/en/gisbook.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2023.

OLIVEIRA, U. C.; NUNES, A. B. A. Análise de Áreas de Vulnerabilidade a Processos Erosivos Por Meio de Lógica Fuzzy e Análise Multicritério na Bacia Hidrográfica do Rio Boa Viagem, Ceará, Brasil. **Geosciences = Geociências**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 927–942, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v41i04.16812>.

ORTIZ, R. A.; MOTTA, R. S.; FERRAZ, C. A Estimação do valor ambiental do Parque Nacional do Iguaçu através do método de custo viagem. **Pesq. Plan. Econ.**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 3, p. 355-382, 2000.

OSTOVARI, Y. et al. GIS and multi-criteria decision-making analysis assessment of land suitability for rapeseed farming in calcareous soils of semi-arid regions. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 103, p. 479–487, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.04.051>.

OWOLABI, S. T. et al. A groundwater potential zone mapping approach for semi-arid environments using remote sensing (RS), geographic information system (GIS), and analytical hierarchical process (AHP) techniques: a case study of Buffalo catchment, Eastern Cape, South Africa. **Arabian journal of geosciences**, [s. l.], v. 13, p. 1-17, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-020-06166-0>.

OYANA, T. J. **Spatial Analysis with R: Statistics, Visualization, and computational Methods**. Taylor & Francis Group, 355p. 2021.

ÖZKAN, B.; DENGİZ, O.; TURAN, İ. D. Site suitability analysis for potential agricultural land with spatial fuzzy multi-criteria decision analysis in regional scale under semi-arid terrestrial ecosystem. **Scientific reports**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 22074, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79105-4>.

OZTURK, D.; BATUK, F. Implementation of GIS-based multicriteria decision analysis with VB in ArcGIS. **International Journal of Information Technology and Decision Making**, [s. l.], v. 10, n. 6, p. 1023–1042. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1142/S0219622011004695>.

PASALARI, H. et al. Landfill site selection using a hybrid system of AHP-Fuzzy in GIS environment: A case study in Shiraz city, Iran. **MethodsX**, [s. l.], v. 6, p. 1454–1466, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2019.06.009>.

PATRO, S. G. K.; SAHU, K. K. **Normalization: A Preprocessing Stage**. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1503.06462>. Acesso em: 13 set. 2023.

PAZ, R. J. et al. **O Direito ao Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado**. Cabedelo, PB: Editora IESP, 2018. DOI: <https://doi.org/10.21438/9788555970412>.

PEDRYCZ, W.; EKEL, P. Y.; PARREIRAS, R. O. **Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods and Applications**. First. [s.l.]: Wiley, 2011.

PEIXOTO, D. R. S.; SILVA, E. R.; ALMEIRA, J. R. Valoração econômica de recurso ambiental (VERA) da bacia hidrográfica de Guapi/Macacu (RJ). **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, [s. l.], v. 7, n. 2, p. 217–24, 2016. DOI: <https://doi.org/10.6008/SPC2179-6858.2016.002.0018>.

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. Open Source Geospatial Foundation Project. 2023. Disponível em: <http://qgis.osgeo.org>. Acesso em: 22 jun. 2023.

RAHMATI, O.; ZEINIVAND, H.; BESHARAT, M. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 1000-1017, 2016. DOI: <doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>.

RAMOS, R. A. R. **Localização Industrial – Um Modelo Espacial para o Nordeste de Portugal**. Dissertação de Doutorado. Universidade do Minho. Braga, Portugal. 2000.

REHMAN, A. et al. Multi-Hazard Susceptibility Assessment Using the Analytical Hierarchy Process and Frequency Ratio Techniques in the Northwest Himalayas, Pakistan. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 554, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs14030554>.

REN, J.; SOVACOOOL, B. K. Enhancing China's energy security: Determining influential factors and effective strategic measures. **Energy Conversion and Management**, [s. l.], v. 88, p. 589–597, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.09.001>.

RIBEIRO, A. C. M. L.; SANTOS, C. D. Isso não é uma pirâmide: revisando o modelo clássico de dado, informação, conhecimento e sabedoria. **Ciência da Informação**, [s. l.], v. 49, n. 2, 2020. DOI: <10.18225/ci.inf.v49i2.5066>.

RIGHI, E.; BASSO, L. A. Application and Analysis of Interpolation Techniques for Spatialization of Rainfall. **Ambiência**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 101-117, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5935/ambiencia.2016.01.06>.

ROSA, R. M.; FERREIRA, V. O. Vulnerabilidade Natural à Perda de Solos na Unidade de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos Afluentes Mineiros do Baixo Paranaíba. **Revista Geoaraguaia**, [s. l.], v. 11, n. especial, p. 107-131, 2021.

RStudio Team (2022). **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, PBC, Boston, 2022. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>. Acesso em: 20 jun. 2022.

SAATY, T. L. **The analytic hierarchy process**. New York: McGraw-Hill. 1980.

SAATY, T. L. Decision making—the analytic hierarchy and network processes (AHP/ANP). **Journal of systems science and systems engineering**, [s. l.], v. 13, p. 1-35, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11518-006-0151-5>.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. **The Logic of Priorities: The Logic of Priorities Applications in Business, Energy, Health, and Transportation**. New York: Springer. 1982.

SANCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos**. 3ª ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2020.

SÁNCHEZ-LOZANO, J. M.; CORREA-RUBIO, J. C.; FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M. A double fuzzy multi-criteria analysis to evaluate international high-performance aircrafts for defense purposes. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, [s. l.], v. 115, p. 105339, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2022.105339>.

SANTL, S.; STEINMAN, F. Hydropower suitability analysis on a large scale level: inclusion of a calibration phase to support determination of model parameters. **Water Resources Management**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 109-123, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-014-0830-9>.

SÃO MIGUEL, A. E.; MEDEIROS, R. B.; GOMES, W. M. Emprego do sensoriamento remoto e sistema de informação geográfica na avaliação da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do ribeirão São Pedro, Santa Rita do Pardo/MS. **Revista Cerrados**, Montes Claros – MG, v. 16, n. 2, p. 31-50, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22238/rc24482692201816023150>.

SARI, J. P.; GERNOWO, R.; SUSENO, J. E. Deciding Endemic Area of Dengue Fever using Simple Multi Attribute Rating Technique Exploiting Ranks. **In: 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE)**, Bali, Indonesia, p. 482-487, 2018. DOI: [10.1109/ICITEED.2018.8534882](https://doi.org/10.1109/ICITEED.2018.8534882).

SAYL, K. N.; MOHAMMED, A. S.; AHMED, A. D. GIS-based approach for rainwater harvesting site selection. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], p. 012246, 2020. DOI: [10.1088/1757-899X/737/1/012246](https://doi.org/10.1088/1757-899X/737/1/012246).

SCHMITT, J. **Crime sem castigo: a efetividade da fiscalização ambiental para o controle do desmatamento ilegal na Amazônia**. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, 188 p. 2015.

SHABAN, A.; KHAWLIE, M.; ABDALLAH, C. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: the case of Occidental Lebanon. **Hydrogeology**

Journal, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 433-443, 2006. DOI: [10.1007/s10040-005-0437-6](https://doi.org/10.1007/s10040-005-0437-6).

SHANKAR, M. N. R.; MOHAN, G. Assessment of the Groundwater Potential and Quality in Bhatsa and Kalu River Basins of Thane District, Western Deccan Volcanic Province of India. **Environmental Geology**, [s. l.], v. 49, p. 990-998, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00254-005-0137-5>.

SILVA, A. N. R. et al. SIG: Uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes. 1. ed. [s.l.]: EdUFSCar, 2008.

SILVA, D. M. **Dano ambiental e sua reparação**. 1. ed. 3. Reimpressão. Curitiba: Juruá, 2008.

SILVA, E. A. **Mapeamento do uso e cobertura vegetal do Município de Floresta PE**. 56 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2011.

SILVA, J. X. Geoprocessamento em estudos ambientais. **In: Geomática: modelos e aplicações ambientais**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 23–53, 2007.

SILVA, K. N. D.; FERREIRA, E. C.; LOUREIRO, G. E. Fragilidade Ambiental da Sub-Região Hidrográfica Itacaiúnas (SRHI). **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 10, n. 3, 2021. DOI: [10.33448/rsd-v10i3.13215](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13215).

SILVA, L. M. L. **Modelos e métodos para análise multicritério e tomada de decisão espacial em ambiente de incertezas e suas aplicações**. 168 f. Tese – (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2020.

SILVA, M. L. S. **Modelos e Técnicas para Análise Multicritério e Tomada de Decisão Espacial em Ambiente de Incertezas e suas Aplicações**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

SILVA, R. F. T. **Manual de Direito Ambiente**. 5ª ed. Salvador, JUS PODIVM, 2015.

SILVA, T. A. et al. Mapeamento da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Candeias, RO. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 58–68, 2020. DOI: <https://doi.org/10.24221/jeap.5.1.2020.2702.058-068>.

SOARES, L. P. **Caracterização climática do estado do Ceará com base nos agentes da circulação regional produtores dos tipos de tempo**. 241 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2015.

SOMSUK, N.; LAOSIRIHONGTHONG, T. A fuzzy AHP to prioritize enabling factors for strategic management of university business incubators: Resource-based view. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 85, 2014, p. 198-210, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.08.007>.

SOUZA, M. J. N. Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. **In: Compartimentação territorial e gestão regional do ceará: parte 1**. Fortaleza: UECE, Funceme, p. 13-98, 2000.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelos de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STAIR, R. M.; REYNOLDS, G. W. **Princípios de Sistemas de Informação**. Ed.: Cengage Learning, 2015.

STEFANO, N. M. **Critérios para avaliação da gestão de periódicos científicos eletrônicos sob a ótica do capital intelectual**. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014.

ŠUŠNJAR, S. et al. Environmental Suitability of the City of East Sarajevo for the Location of Municipal Solid Waste Disposal Site Using a GIS Based Multi-Criteria Analysis. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 857–70, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/139382>.

TCHEMRA, A. H. **Tabela de decisão adaptativa na tomada de decisões multicritério**. 172 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais. São Paulo, 2009.

TERUYA JUNIOR, H. et al. Vulnerabilidade Natural e Ambiental da Bacia Hidrográfica Rio Formoso, Mato Grosso do Sul. Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, v. 41 – 42, p. 41-50, 2018.

TOMLIN, D. **Geographic information systems and Cartographic Modeling**. Prentice Hall, New York, 1990.

TORRES, D. R. **Análise multitemporal do uso da terra e cobertura florestal com dados dos satélites LANDSAT e ALOS**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2011.

TÜRK, S.; KOÇA.; ŞAHIN, G. Multi-criteria of PV solar site selection problem using GIS-intuitionistic fuzzy based approach in Erzurum province/Turkey. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 5034, 2021. DOI: <https://doi-org.ez11.periodicos.capes.gov.br/10.1038/s41598-021-84257-y>.

VALVERDE, J. P. B. et al. Application of a GIS multi-criteria decision analysis for the identification of intrinsic suitable sites in Costa Rica for the application of Managed Aquifer Recharge (MAR) through spreading methods. **Water**, [s. l.], v. 8, n. 9, p. 391, 2016. DOI: [10.3390/w8090391](https://doi.org/10.3390/w8090391).

VASSONEYA, E.; MOCHETB, A. M.; COMOGLIO, C. Use of multicriteria analysis (MCA) for sustainable hydropower planning and management. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 196, p. 48-55, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135310>.

WANG, X.; DURUGBO, C. Analysing network uncertainty for industrial product-service delivery: A hybrid fuzzy approach. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 40, n. 11, p. 4621–4636, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.01.062>.

WILKIE, D. et al. Roads, Development, and Conservation in the Congo Basin. **Conservation Biology**, [s. l.], v. 14, n. 6, p. 1614–1622, 2000. DOI: <http://www.jstor.org/stable/2641513>.

WORBOYS, M. F. **GIS: A Computing Perspective**. London, Taylor and Francis, 1995.

XU, E.; ZHANG, H. Spatially-explicit sensitivity analysis for land suitability evaluation. **Applied Geography**, [s. l.], v. 45, p. 1-9, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.08.005>.

YAGER, R. R. On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decision making. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 183-190, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1109/21.87068>.

YANG, C. **Introduction to GIS Programming and Fundamentals with Python and ArcGIS**. London, Taylor and Francis, 329p. 2017.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241-x](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241-x).

ZADEH, L. A. Is there a need for fuzzy logic? **Information Sciences**, [s. l.], v. 178, n. 13, p. 2751–2779, 2008. DOI: [doi:10.1016/j.ins.2008.02.012](https://doi.org/10.1016/j.ins.2008.02.012).

ZALHAF, A. S. et al. A High-Resolution Wind Farms Suitability Mapping Using GIS and Fuzzy AHP Approach: a national-level case study in sudan. **Sustainability**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 358, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su14010358>.

ZARGHAMI, M.; SZIDAROVSKY, F. **Multicriteria analysis applications to water and environment management**. Berlin/Heidelberg: Springer. 2011.

ZHANG, J. Evaluating regional low-carbon tourism strategies using the fuzzy Delphi-analytic network process approach. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 141, p. 409-419, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.122>.

ZUFFO, A. C. **Seleção e aplicação de métodos multicriteriais ao planejamento ambiental de recursos hídricos**. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

**APÊNDICE A - CRITÉRIOS SELECIONADOS COM BASE NA LITERATURA
CONSULTADA**

Crítérios – Fase 1	Literatura
Aceitação Social	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
Água Subterrânea	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
Área da Bacia	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
Área Edificada	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
Área Geográfica	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
Área Histórica	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
Área Líquida Semeada	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Rugosidade do Terreno	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Özkan, Dengiz e Turan (2020)
	Türk, Koç e Şahin (2021)
Clima	Fildes <i>et al.</i> (2020)
Cobertura Florestal	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Comprimento Médio de Cursos D'água de Primeira Ordem	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
Concentração de PM10	Ghosh <i>et al.</i> (2020)
Curvatura	Rehman <i>et al.</i> (2022)
Curve Number - CN	Ali <i>et al.</i> (2020)
Declividade	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
	Sayl, Mohammed e Ahmed (2020)
	Dilekoglu e Aslan (2021)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Özkan, Dengiz e Turan (2020)
	Türk, Koç e Şahin (2021)
	Alafta e Opp (2021)
Elboshy <i>et al.</i> (2022)	
Dilekoglu e Aslan (2021)	
Densidade da Rede Viária	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
Densidade de Drenagem	Ali <i>et al.</i> (2020)

	Dilekoglu e Aslan (2021)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Hagos <i>et al.</i> (2022)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
	Alafta e Opp (2021)
	Dilekoglu e Aslan (2021)
Densidade de lineamentos	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
Direção do vento	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
Distância de Aeroportos	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
Distância de Áreas Industriais	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
Distância de Áreas Protegidas	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
Distância de Falhas Geológicas	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
Distância de Linhas de Transmissão de Energia	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
	Türk, Koç e Şahin (2021)
Distância de Núcleos Urbanos	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
Distância de Poços	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
Distância de Recursos Hídricos	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Alafta e Opp (2021)
Distância de Vias	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)

	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
Elevação/Altitude	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Hagos <i>et al.</i> (2022)
	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Özkan, Dengiz e Turan (2020)
	Alafta e Opp (2021)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
	Dilekoğlu e Aslan (2021)
Geologia	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Dilekoglu e Aslan (2021)
	Fildes <i>et al.</i> (2020)
	Dilekoğlu e Aslan (2021)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
Geomorfologia	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
	Dilekoğlu e Aslan (2021)
Gradiente Médio da Bacia	Dilekoğlu e Aslan (2021)
Hidrogeologia	Baran-Zgłobicka, <i>et al.</i> (2021)
Índice de Circularidade	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
Índice de Convergência	Ali <i>et al.</i> (2020)
Índice de Poder de Fluxo	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
Índice de Posição Topográfica	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
Índice de Rugosidade do Terreno	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Ali <i>et al.</i> (2020)
Índice de Transporte de Sedimentos	Ali <i>et al.</i> (2020)
Índice de Umidade Topográfica	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
Infraestrutura	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
Irradiação solar	Türk, Koç e Şahin (2021)
Irradiância Horizontal Global	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
Irradiância Normal Direta	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
Litologia	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Alafta e Opp (2021)
	Ali <i>et al.</i> (2020)
Material do Leito Rochoso	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
Média Anual de Dias Nublados	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
NDMI – Índice de Umidade da Vegetação	Ghosh <i>et al.</i> (2020)

NDVI – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada	Ghosh <i>et al.</i> (2020)
Número de Distritos	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Orientação do Terreno	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Dilekoglu e Aslan (2021)
Pluviosidade	Dilekoglu e Aslan (2021)
	Alafta e Opp (2021)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Arabameri <i>et al.</i> (2019)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Dilekoğlu e Aslan (2021)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
	Kumar <i>et al.</i> (2021)
	Ali <i>et al.</i> (2020)
Poluição Sonora	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
População	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Potencial de captação de água da chuva	Sayl, Mohammed e Ahmed (2020)
Pressão atmosférica	Türk, Koç e Şahin (2021)
Profundidade do Escoamento	Sayl, Mohammed e Ahmed (2020)
Profundidade do Lençol Freático	Dilekoğlu e Aslan (2021)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
Radiação solar	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
Rede de Drenagem	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Sayl, Mohammed e Ahmed (2020)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Fildes <i>et al.</i> (2020)
Risco à saúde	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
Solos	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Ajibade <i>et al.</i> (2019)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Sayl, Mohammed e Ahmed (2020)
	Hagos <i>et al.</i> (2022)
	Alafta e Opp (2021)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
Dilekoglu e Aslan (2021)	
Taxa de Incidência de Raios	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
Temperatura da Superfície Terrestre	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Ghosh <i>et al.</i> (2020)
Temperatura do Ar	Elboshy <i>et al.</i> (2022)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
	Kumar <i>et al.</i> (2021)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)

	Türk, Koç e Şahin (2021)
	Ostovari <i>et al.</i> (2019)
Terra sob cultivo de árvores variadas e bosques não incluídos na área semeada líquida	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Terras em Pousio	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Textura do solo	Kumar <i>et al.</i> (2021)
Umidade do Ar	Türk, Koç e Şahin (2021)
Uso e Cobertura da Terra	Ali <i>et al.</i> (2020)
	Kumar <i>et al.</i> (2021)
	Pasalari <i>et al.</i> (2019)
	Ghasemi <i>et al.</i> (2019)
	Ghoushchi <i>et al.</i> (2021)
	Sayl, Mohammed e Ahmed (2020)
	Barzehkar <i>et al.</i> (2019)
	Owolabi <i>et al.</i> (2020)
	Hagos <i>et al.</i> (2022)
	Rehman <i>et al.</i> (2022)
	Özkan, Dengiz e Turan (2020)
	Türk, Koç e Şahin (2021)
	Alafta e Opp (2021)
	Dilekoglu e Aslan (2021)
Velocidade do vento	Zalhaf <i>et al.</i> (2021)
	Türk, Koç e Şahin (2021)

APÊNDICE B - CONSULTA FUZZY DELPHI PARA O DESENVOLVIMENTO DE UM ÍNDICE PARA ESTIMATIVA DA GRAVIDADE DO DA INFRAÇÃO AMBIENTAL

Prezado (a),

Venho solicitar a sua colaboração voluntária no preenchimento deste questionário, instrumento de coleta de dados, para desenvolver um índice denominado Índice de Gravidade da Infração Ambiental - IGIA com base nos critérios apresentados a seguir.

Esse instrumento constitui uma importante etapa da minha tese de doutorado que está sendo desenvolvida sob orientação da Professora Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos) da Universidade Federal do Ceará.

Esse questionário visa apoiar a seleção de critérios que sejam mais adequados na composição do referido índice. Para isso, os critérios pré-selecionados serão ponderados por meio de critérios segundo a percepção de um grupo de especialistas (profissionais) na área de meio ambiente.

Todas as informações aqui fornecidas são sigilosas e somente serão utilizadas para a validação dos critérios pré-selecionados. As respostas concedidas serão analisadas e tabuladas, respeitando o anonimato dos respondentes.

O prazo de envio do questionário pelo respondente será de 15 dias.
Agradeço a colaboração e me disponho a responder quaisquer dúvidas.

Atenciosamente,
Ulisses Costa de Oliveira
Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará.
E-mail: ucoliveira@gmail.com

1. Identificação do respondente

Nome Completo:	
E-mail:	
Formação:	
Ocupação atual:	
Organização/Instituição/Empresa:	
Cidade/UF:	
Indique a esfera de atuação em que você se enquadra na área ambiental:	Pesquisador/Especialista
	Órgão Ambiental
	Consultor Ambiental
	Outros (especificar)

2. Avaliação dos critérios quanto à sua importância na gravidade da infração ambiental

De acordo com a seu ponto de vista, indique a **IMPORTÂNCIA** dos critérios abaixo listados quanto à sua importância na gravidade da infração ambiental, ou seja, qual a **relevância** do critério no agravamento de um determinado dano ambiental, quando ocorrer. Assim, nesta fase da pesquisa, o objetivo é mapear quais critérios podem compor o Índice de Gravidade da

Infração Ambiental.

A ponderação se dará com base nas Tabelas mostradas em cada critério, com a escala de importância a ser atribuída aos critérios elencados, variando desde a opção *irrelevante*, cujo valor atribuído será 1, até a opção *muito importante*, cujo valor atribuído será 5.

Solos									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Geomorfologia									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Uso e Cobertura da Terra									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Vegetação									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Declividade									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Altitude									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Temperatura da Superfície									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Temperatura do Ar									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Pluviosidade									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Geologia									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Densidade Demográfica								
------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--

	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante
--	-------------	--	------------------	--	----------------------	--	------------	--	------------------

Distância de Vias									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Distância de Recursos Hídricos									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Distância de Áreas Protegidas									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Densidade de Residências									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Distância de Núcleos Urbanos									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Densidade de Focos de Queimada									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Índice de Aridez									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Densidade de Drenagem									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

Clima									
	Irrelevante		Pouco Importante		Importância moderada		Importante		Muito Importante

3. Informações adicionais

- 3.1. Existe algum critério que não tenha sido listado anteriormente e que na sua visão deve fazer parte do conjunto de critérios? Insira ao lado do critério a pontuação da importância.
- 3.2. Se possível, indique até TRÊS profissionais ligados à temática para o preenchimento deste questionário, fornecendo nome e e-mail para contato.

**APÊNDICE C - IMPORTÂNCIA ATRIBUÍDA PELOS ESPECIALISTAS AOS
CRITÉRIOS SELECIONADOS**

ESPECI ALISTA (E)	Solos	Geomorfológica	Uso e Cobertura da Terra	Vegetação	Declividade	Altitude	Temperatura da Superfície	Pluviosidade	Clima	Geologia	Densidade Demográfica	Distância de Vias	Distância de Recursos Hídricos	Distância de Áreas Protegidas	Densidade de Residências	Distância de Núcleos Urbanos	Densidade de Focos de Queimada	IDH	Índice de Aridez	Densidade de Drenagem	Temperatura do Ar
Especialista 1	4	5	5	5	5	2	4	2	3	1	1	1	2	2	2	4	2	5	4	2	3
Especialista 2	1	4	4	4	4	5	5	2	5	1	1	1	3	3	1	1	5	1	5	3	5
Especialista 3	3	3	2	4	2	2	1	2	5	2	1	1	3	4	1	1	2	1	1	1	1
Especialista 4	4	4	5	5	3	3	1	3	3	4	2	1	5	3	3	3	2	2	4	4	1
Especialista 5	3	4	5	5	5	3	3	4	4	4	2	1	5	3	1	3	5	1	5	5	4
Especialista 6	1	2	4	4	4	1	4	2	5	2	2	2	2	3	3	4	2	2	3	2	4
Especialista 7	3	3	3	3	4	4	5	5	5	3	2	2	5	2	2	2	2	2	2	4	5
Especialista 8	5	4	4	4	4	2	3	3	3	4	4	3	4	1	4	4	4	5	5	2	3
Especialista 9	5	5	5	4	5	1	5	3	5	4	2	3	4	3	2	2	2	1	1	4	5
Especialista 10	5	4	5	5	4	3	4	3	1	5	2	3	5	5	2	2	4	1	4	2	4
Especialista 11	5	5	4	4	4	1	1	1	2	2	2	3	3	3	1	2	1	1	3	3	4
Especialista 12	3	4	3	5	4	5	2	4	4	2	3	3	5	5	4	3	3	3	4	5	5
Especialista 13	2	5	4	4	4	2	2	3	4	3	3	3	3	5	4	3	2	3	3	5	1
Especialista 14	3	3	4	5	4	2	2	3	3	3	4	3	5	3	3	2	2	2	3	4	4
Especialista 15	5	4	4	5	4	2	3	4	4	3	4	3	4	3	4	3	3	3	3	1	5
Especialista 16	3	5	5	5	5	1	3	5	5	4	4	3	5	4	4	2	4	2	3	4	3
Especialista 17	4	4	5	5	5	3	4	2	5	4	3	3	3	3	4	2	5	3	3	1	2
Especialista 18	5	4	4	5	4	3	4	2	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	4	5	5
Especialista 19	5	4	3	5	5	5	4	3	4	5	5	4	5	4	5	4	4	4	5	1	4
Especialista 20	5	5	4	5	5	4	3	4	1	4	3	2	2	3	3	5	4	4	4	4	3
Especialista 21	2	4	4	4	5	3	4	3	3	1	5	4	4	1	1	4	4	3	3	4	4
Especialista 22	2	4	4	5	5	4	3	2	5	2	4	4	5	3	4	2	2	1	2	4	2
Especialista 23	4	5	5	2	5	4	1	3	4	3	4	4	4	2	4	3	3	3	4	2	1
Especialista 24	5	5	4	4	4	3	5	4	4	3	2	4	5	5	3	2	3	3	2	3	3
Especialista 25	5	4	5	5	4	4	5	4	4	3	5	4	5	4	5	3	2	5	2	5	3
Especialista 26	5	5	5	3	3	3	3	3	3	4	2	4	3	3	3	3	3	2	2	3	3
Especialista 27	5	5	5	5	5	5	4	2	4	5	4	4	5	5	5	5	4	4	4	5	4

APÊNDICE D - QUESTIONÁRIO FAHP PARA ESTRUTURAÇÃO DO ÍNDICE DE GRAVIDADE DA INFRAÇÃO AMBIENTAL – IGIA

Formulário FAHP para ponderação dos critérios componentes do índice para definição da gravidade da infração ambiental.

O seguinte formulário apresenta um corpo estrutural simples. Será aplicado o método proposto por Thomas L. Saaty (Analytic hierarchy process) aprimorado por Lam *et al.* (2008) e Chou *et al.* (2013), denominado Fuzzy-AHP.

Serão feitas avaliações realizadas em pares sob a diretriz da hierarquia superior, avaliando os critérios à luz do objetivo de ESTRUTURAÇÃO DE UM ÍNDICE DE GRAVIDADE DA INFRAÇÃO AMBIENTAL. As perguntas serão feitas pelo moderador, em termos comparativos, isto é, em pares, com o foco nos critérios definidos.

- > *Clima;*
- > *Uso e Cobertura;*
- > *Geologia;*
- > *Pedologia;*
- > *Declividade;*
- > *Distância de Estradas;*
- > *Distância de Recursos Hídricos.*

O presente questionário foi dividido da seguinte forma:

Seção 1: Dados pessoais;

Seção 2: Avaliação Pareada.

A pergunta a ser respondida é a seguinte: Na sua percepção do que significa "gravidade da infração ambiental", por meio da avaliação dos critérios acima listados, comparando esses critérios um com o outro, par a par, o quão importante um é em relação ao outro?

Quanto ao método adotado, o mesmo se baseia na comparação pareada (par a par) dos critérios escolhidos para contribuir com o objetivo da pesquisa, qual seja, a estruturação de um índice para estimativa da gravidade da infração ambiental (IGIA - Índice de Gravidade da Infração Ambiental).

Para realização da comparação, devem ser atribuídos valores linguísticos qualitativos, conforme descrito abaixo:

- Extremamente mais importante (EMI+)
- Muito mais importante (MMI+)
- Mais importante (MI+)
- Levemente mais importante (LMI+)
- Igualmente Importante (II)
- Levemente Menos importante (LMI-)
- Menos importante (MI-)
- Muito Menos Importante (MMI-)
- Extremamente Menos Importante (EMI-)

A título de exemplo, o exercício envolverá a análise pareada entre dois critérios. A primeira linha da matriz de comparação refere-se à comparação entre o critério Clima e o critério Uso e Cobertura.

O quão importante é o Clima quando comparado ao Uso e Cobertura?

É importante observar que a comparação deve ser feita exatamente nesta ordem, ou seja, avaliando o Clima em relação ao Uso e Cobertura, e não o contrário. Será escolhida uma entre as cinco opções de importância, a critério da percepção do analista.

Fico à disposição para eventuais dúvidas e sugestões.

At.te,

Ulisses Costa de Oliveira

E-mail: ucoliveira@gmail.com

SEÇÃO 1 – DADOS PESSOAIS

Aceita participar da pesquisa?	Sim	Não
Nome Completo:		
E-mail:		
Formação:		
Ocupação Atual:		
Organização/Instituição/Empresa:		
Cidade/UF:		

SEÇÃO 2 – MATRIZ DE AVALIAÇÃO PAREADA

Critérios definidos:

- > Clima;
- > Uso e Cobertura;
- > Geologia;
- > Pedologia;
- > Declividade;
- > Distância de Estradas;
- > Distância de Recursos Hídricos.

A pergunta a ser respondida é a seguinte: Na sua percepção do que significa "gravidade da infração ambiental", por meio da avaliação dos critérios acima listados, comparando esses critérios um com o outro, par a par, o quanto importante um é em relação ao outro?

Para realização da comparação, devem ser atribuídos valores linguísticos qualitativos, conforme descrito abaixo:

- **Extremamente mais importante (EMI+)**
- **Muito mais importante (MMI+)**
- **Mais importante (MI+)**
- **Levemente mais importante (LMI+)**
- **Igualmente Importante (II)**
- **Levemente Menos importante (LMI-)**
- **Menos importante (MI-)**
- **Muito Menos Importante (MMI-)**
- **Extremamente Menos Importante (EMI-)**

A título de exemplo, o exercício envolverá a análise pareada entre dois critérios. A primeira linha da matriz de comparação refere-se à comparação entre o critério Clima e o critério Uso e Cobertura.

O quanto importante é o Clima quando comparado ao Uso e Cobertura?

É importante observar que a comparação deve ser feita exatamente nesta ordem, ou seja, avaliando o Clima em relação ao Uso e Cobertura, e não o contrário. Será escolhida uma entre as cinco opções de importância, a critério da percepção do analista.

	Extremamente mais importante (EMI+)	Muito mais importante (MMI+)	Mais importante (MI+)	Levemente mais importante (LMI+)	Igualmente importante (II)	Levemente Menos importante (LMI-)	Menos importante (MI-)	Muito Menos Importante (MMI-)	Extremamente Menos Importante (EMI-)	
Geologia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Declividade
Geologia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Estradas
Geologia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Recursos Hídricos
Pedologia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Declividade
Pedologia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Estradas
Pedologia	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Recursos Hídricos
Declividade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Estradas
Declividade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Recursos Hídricos
Distância de Estradas	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Distância de Recursos Hídricos

**APÊNDICE E - MATRIZES DE COMPARAÇÃO PAREADA DOS ESPECIALISTAS
POR MEIO DAS VARIÁVEIS LINGUÍSTICAS**

E1	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI-	LMI-	LMI-	MI-	MI-	EMI-
USCO	MI+	II	MI+	MMI+	MI+	MI+	II
GEOL	LMI+	MI-	II	II	MI-	MMI-	MI-
PEDO	LMI+	MMI-	II	II	LMI-	MI-	MI-
DECL	MI+	MI-	MI+	LMI+	II	MI-	LMI-
DVIAS	MI+	MI-	MMI+	MI+	MI+	II	MI-
DIRH	EMI+	II	MI+	MI+	LMI+	MI+	II

E2	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	EMI+	LMI+	EMI+	LMI+	MI+	MMI+
USCO	EMI-	II	MI+	EMI+	MMI+	LMI+	MMI+
GEOL	LMI-	MI-	II	MMI+	LMI+	LMI-	II
PEDO	EMI-	EMI-	MMI-	II	EMI+	MMI+	MMI+
DECL	LMI-	MMI-	LMI-	EMI-	II	LMI-	II
DVIAS	MI-	LMI-	LMI+	MMI-	LMI+	II	II
DIRH	MMI-	MMI-	II	MMI-	II	II	II

E3	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI-	LMI-	MI-	MI-	MI-	MI-
USCO	MI+	II	MI+	LMI+	MI+	MI+	LMI+
GEOL	LMI+	MI-	II	LMI-	MI-	LMI-	MI-
PEDO	MI+	LMI-	LMI+	II	LMI-	MI-	MI-
DECL	MI+	MI-	MI+	LMI+	II	LMI-	LMI+
DVIAS	MI+	MI-	LMI+	MI+	LMI+	II	MI-
DIRH	MI+	LMI-	MI+	MI+	LMI-	MI+	II

E4	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	EMI+	LMI+	EMI+	EMI+	MI+	MMI+
USCO	EMI-	II	MI+	MMI+	EMI+	MMI+	EMI+
GEOL	LMI-	MI-	II	EMI+	MMI+	MI+	MMI+
PEDO	EMI-	MMI-	EMI-	II	EMI+	MMI+	EMI+
DECL	EMI-	EMI-	MMI-	EMI-	II	EMI+	EMI+
DVIAS	MI-	MMI-	MI-	MMI-	EMI-	II	MI+
DIRH	MMI-	EMI-	MMI-	EMI-	EMI-	MI-	II

E5	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI+	MI+	MI+	MI+	MMI+	MMI+
USCO	MI-	II	LMI+	LMI+	LMI+	MI+	MI+
GEOL	MI-	LMI-	II	II	LMI-	LMI-	LMI-

PEDO	MI-	LMI-	II	II	II	LMI-	LMI-
DECL	MI-	LMI-	LMI+	II	II	LMI-	LMI-
DVIAS	MMI-	MI-	LMI+	LMI+	LMI+	II	LMI-
DIRH	MMI-	MI-	LMI+	LMI+	LMI+	LMI+	II

E6	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	EMI+	MI+	MI+	MMI+	LMI+	EMI-
USCO	EMI-	II	MI+	MMI+	MMI+	LMI+	II
GEOL	MI-	MI-	II	MI+	MI-	LMI+	MI-
PEDO	MI-	MMI-	MI-	II	MI-	LMI+	MI-
DECL	MMI-	MMI-	MI+	MI+	II	LMI+	LMI-
DVIAS	LMI-	LMI-	LMI-	LMI-	LMI-	II	MI-
DIRH	EMI+	II	MI+	MI+	LMI+	MI+	II

E7	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI-	LMI-	MI-	MMI-	MI-	EMI-
USCO	MI+	II	MI+	MMI+	MI-	EMI-	MI-
GEOL	LMI+	MI-	II	MI+	MI-	MI-	MMI+
PEDO	MI+	MMI-	MI-	II	LMI-	LMI-	EMI-
DECL	MMI+	MI+	MI+	LMI+	II	MI+	EMI+
DVIAS	MI+	EMI+	MI+	LMI+	MI-	II	LMI-
DIRH	EMI+	MI+	MMI-	EMI+	EMI-	LMI+	II

E8	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI+	MMI+	LMI+	LMI+	LMI+	MI+
USCO	MI-	II	LMI+	LMI+	MI+	II	LMI+
GEOL	MMI-	LMI-	II	II	LMI+	MI-	LMI+
PEDO	LMI-	LMI-	II	II	MI+	II	LMI+
DECL	LMI-	MI-	LMI-	MI-	II	LMI+	LMI+
DVIAS	LMI-	II	MI+	II	LMI-	II	LMI+
DIRH	MI-	LMI-	LMI-	LMI-	LMI-	LMI-	II

E9	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	LMI-	LMI+	II	II	MI-	MI+
USCO	LMI+	II	MI+	LMI+	MMI+	MMI+	MI+
GEOL	LMI-	MI-	II	LMI-	II	MI+	LMI-
PEDO	II	LMI-	LMI+	II	LMI-	LMI+	MI+
DECL	II	MMI-	II	LMI+	II	MI+	LMI+
DVIAS	MI+	MMI-	MI-	LMI-	MI-	II	II
DIRH	MI-	MI-	LMI+	MI-	LMI-	II	II

E10	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI-	LMI-	MI-	MMI-	MI-	EMI-

USCO	MI+	II	LMI-	LMI-	MI-	EMI-	EMI-
GEOL	LMI+	LMI+	II	II	MI-	MI-	MI-
PEDO	MI+	LMI+	II	II	LMI-	LMI-	LMI-
DECL	MMI+	MI+	MI+	LMI+	II	LMI+	LMI+
DVIAS	MI+	EMI+	MI+	LMI+	LMI-	II	EMI-
DIRH	EMI+	EMI+	MI+	LMI+	LMI-	EMI+	II

E11	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	MI-	LMI-	MI-	MMI-	MI-	EMI-
USCO	MI+	II	II	MI+	LMI+	MMI+	II
GEOL	LMI+	II	II	MMI-	MI-	MMI-	MI-
PEDO	MI+	MI-	MMI+	II	LMI-	II	MI-
DECL	MMI+	LMI-	MI+	LMI+	II	II	LMI-
DVIAS	MI+	MMI-	MMI+	II	II	II	MI-
DIRH	EMI+	II	MI+	MI+	LMI+	MI+	II

E12	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH
CLIM	II	EMI-	LMI+	LMI-	MI-	MI-	EMI-
USCO	EMI+	II	EMI+	MI+	LMI+	MI+	II
GEOL	LMI-	MI-	II	MMI-	MI-	MMI-	MI-
PEDO	LMI+	MI-	MMI+	II	LMI+	MMI+	MI-
DECL	MI+	LMI-	MI+	LMI-	II	MMI+	LMI-
DVIAS	MI+	MI-	MMI+	MMI-	MMI-	II	MI-
DIRH	EMI+	II	MI+	MI+	LMI+	MI+	II

**APÊNDICE F - MATRIZES DE COMPARAÇÃO PAREADA DOS ESPECIALISTAS
CONVERTIDAS EM NÚMEROS FUZZY TRIANGULARES**

CLIM	1	1	1	7	9	11	1	3	5	7	9	11	7	9	11	3	5	7	5	7	9	
USCO	1/11	1/9	1/7	1	1	1	3	5	7	5	7	9	7	9	11	5	7	9	7	9	11	
GEOL	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1	1	1	7	9	11	5	7	9	3	5	7	5	7	9	
PEDO	1/11	1/9	1/7	1/9	1/7	1/5	1/11	1/9	1/7	1	1	1	7	9	11	5	7	9	7	9	11	
DECL	1/11	1/9	1/7	1/11	1/9	1/7	1/9	1/7	1/5	1/11	1/9	1/7	1	1	1	7	9	11	7	9	11	
DVIAS	1/7	1/5	1/3	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1/9	1/7	1/5	1/11	1/9	1/7	1	1	1	1	3	5	7
DIRH	1/9	1/7	1/5	1/11	1/9	1/7	1/9	1/7	1/5	1/11	1/9	1/7	1/11	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3	1	1	1	1

ESPECIALISTA 5	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH														
CLIM	1	1	3	5	7	3	5	7	3	5	7	5	7	9	5	7	9				
USCO	1/7	1/5	1/3	1	1	3	5	1	3	5	1	3	5	3	5	7	3	5	7		
GEOL	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1	1	1	1	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	
PEDO	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	
DECL	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1	3	5	1	1	1	1	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	
DVIAS	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	1	1	1/5	1/3	1
DIRH	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	3	5	1	1	1

ESPECIALISTA 6	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH														
CLIM	1	1	1	7	9	11	3	5	7	3	5	7	5	7	9	1	3	5	1/11	1/9	1/7
USCO	1/11	1/9	1/7	1	1	1	3	5	7	5	7	9	5	7	9	1	3	5	1	1	1
GEOL	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1	1	1	3	5	7	1/7	1/5	1/3	1	3	5	1/7	1/5	1/3
PEDO	1/7	1/5	1/3	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1	1	1	1/7	1/5	1/3	1	3	5	1/7	1/5	1/3
DECL	1/9	1/7	1/5	1/9	1/7	1/5	3	5	7	3	5	7	1	1	1	1	3	5	1/5	1/3	1
DVIAS	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1	1	1	1/7	1/5	1/3
DIRH	7	9	11	1	1	1	3	5	7	3	5	7	1	3	5	3	5	7	1	1	1

ESPECIALISTA 7	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH													
CLIM	1	1	1	1/7	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1/9	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1/11	1/9	1/7

USCO	3	5	7	1	1	3	5	7	5	7	9	1/7	1/5	1/3	1/11	1/9	1/7	1/7	1/5	1/3
GEOL	1	3	5	1/7	1/5	1/3	1	1	3	5	7	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	5	7	9
PEDO	3	5	7	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/11	1/9	1/7
DECL	5	7	9	3	5	7	3	5	7	1	3	5	1	1	3	5	7	7	9	11
DVIAS	3	5	7	7	9	11	3	5	7	1	3	5	1/7	1/5	1/3	1	1	1/5	1/3	1
DIRH	7	9	11	3	5	7	1/9	1/7	1/5	7	9	1/11	1/9	1/7	1	3	5	1	1	1

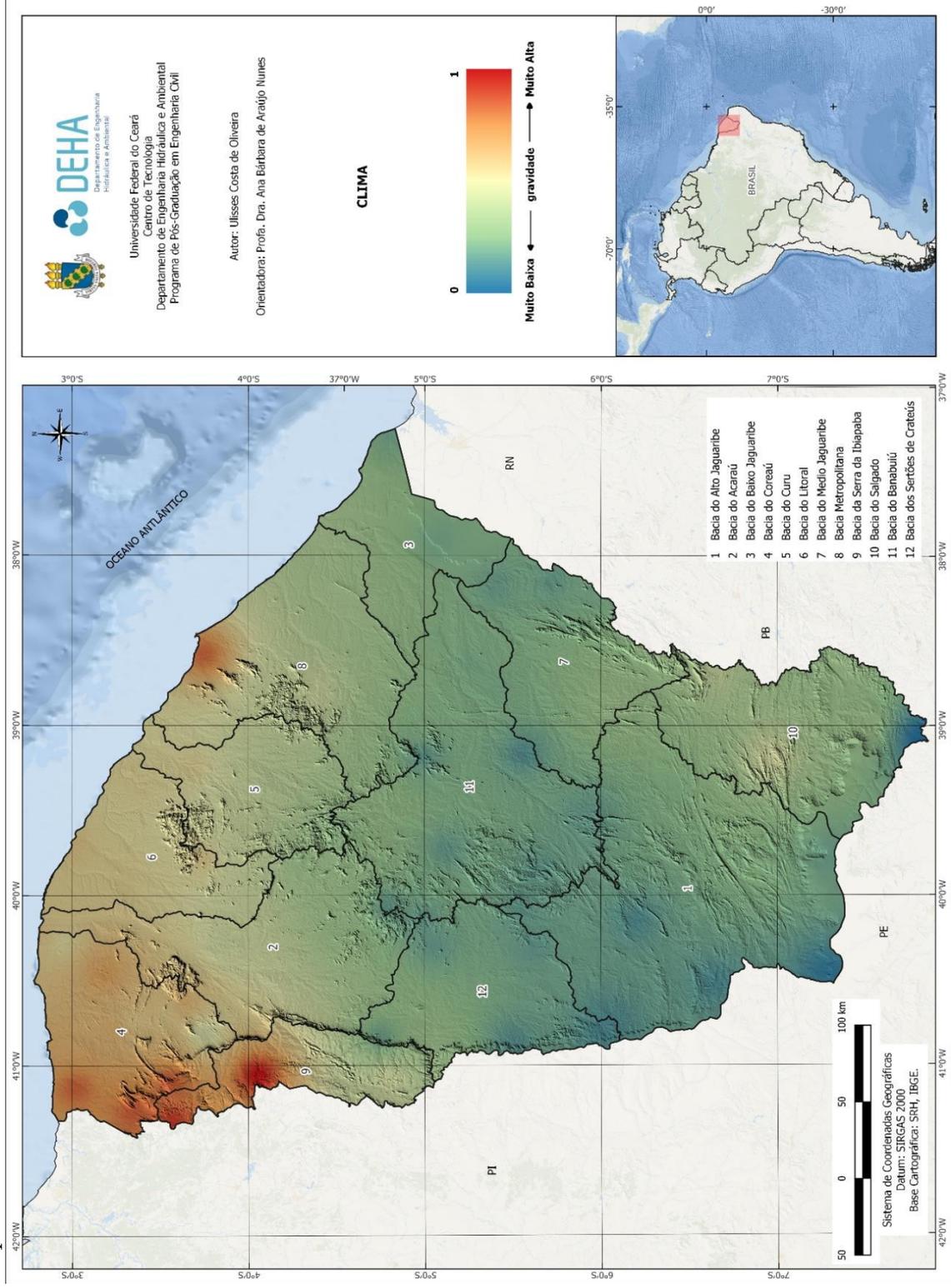
ESPECIALISTA 8	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH													
CLIM	1	1	3	5	7	9	1	3	5	1	3	5	7							
USCO	1/7	1/5	1/3	1	1	3	5	1	3	5	7	1	1	3	5					
GEOL	1/9	1/7	1/5	1/5	1/3	1	1	1	1	1	3	5	1/7	1/5	1/3	1	3	5		
PEDO	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1	1	1	1	3	5	7	1	1	1	1	3	5	
DECL	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1	1	1	3	5	1	3	5	7	
DVIAS	1/5	1/3	1	1	1	3	5	7	1	1	1/5	1/3	1	1	1	1	1	3	5	
DIRH	1/7	1/5	1/3	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1/5	1/3	1	1	1	1	3	5

ESPECIALISTA 9	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH													
CLIM	1	1	1	1/5	1/3	1	1	3	5	1	1	1	1	1/7	1/5	1/3	3	5	7	
USCO	1	3	5	1	1	3	5	7	1	3	5	5	7	9	5	7	9	3	5	7
GEOL	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1	1	1	1/5	1/3	1	1	1	3	5	7	1/5	1/3	1
PEDO	1	1	1	1/5	1/3	1	1	3	5	1	1	1/5	1/3	1	1	3	5	3	5	7
DECL	1	1	1	1/9	1/7	1/5	1	1	1	3	5	1	1	1	3	5	7	1	3	5
DVIAS	3	5	7	1/9	1/7	1/5	1/7	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1	1	1	1	1	1	1
DIRH	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1	3	5	1/7	1/5	1/3	1	1	1	1	1	1	1	1

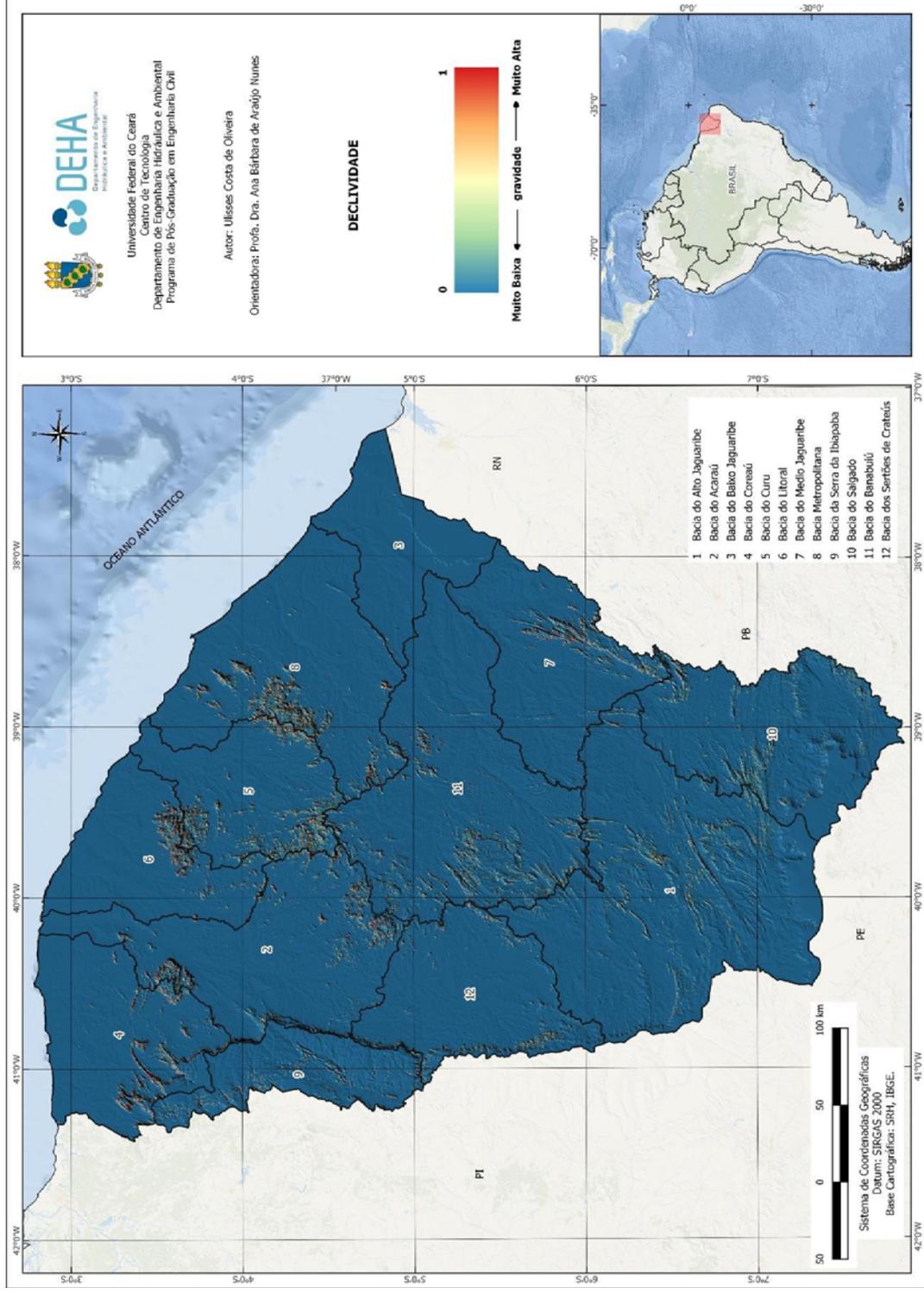
ESPECIALISTA 10	CLIM	USCO	GEOL	PEDO	DECL	DVIAS	DIRH													
CLIM	1	1	1	1/7	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1/9	1/7	1/5	1/3	1/7	1/5	1/3	1/11	1/9	1/7
USCO	3	5	7	1	1	1	1	1/5	1/3	1	1/7	1/5	1/3	1	1/11	1/9	1/7	1/11	1/9	1/7

APÊNDICE G - MAPAS DOS CRITÉRIOS NORMALIZADOS

Mapa G1 – Clima



Mapa G2 –Declividade



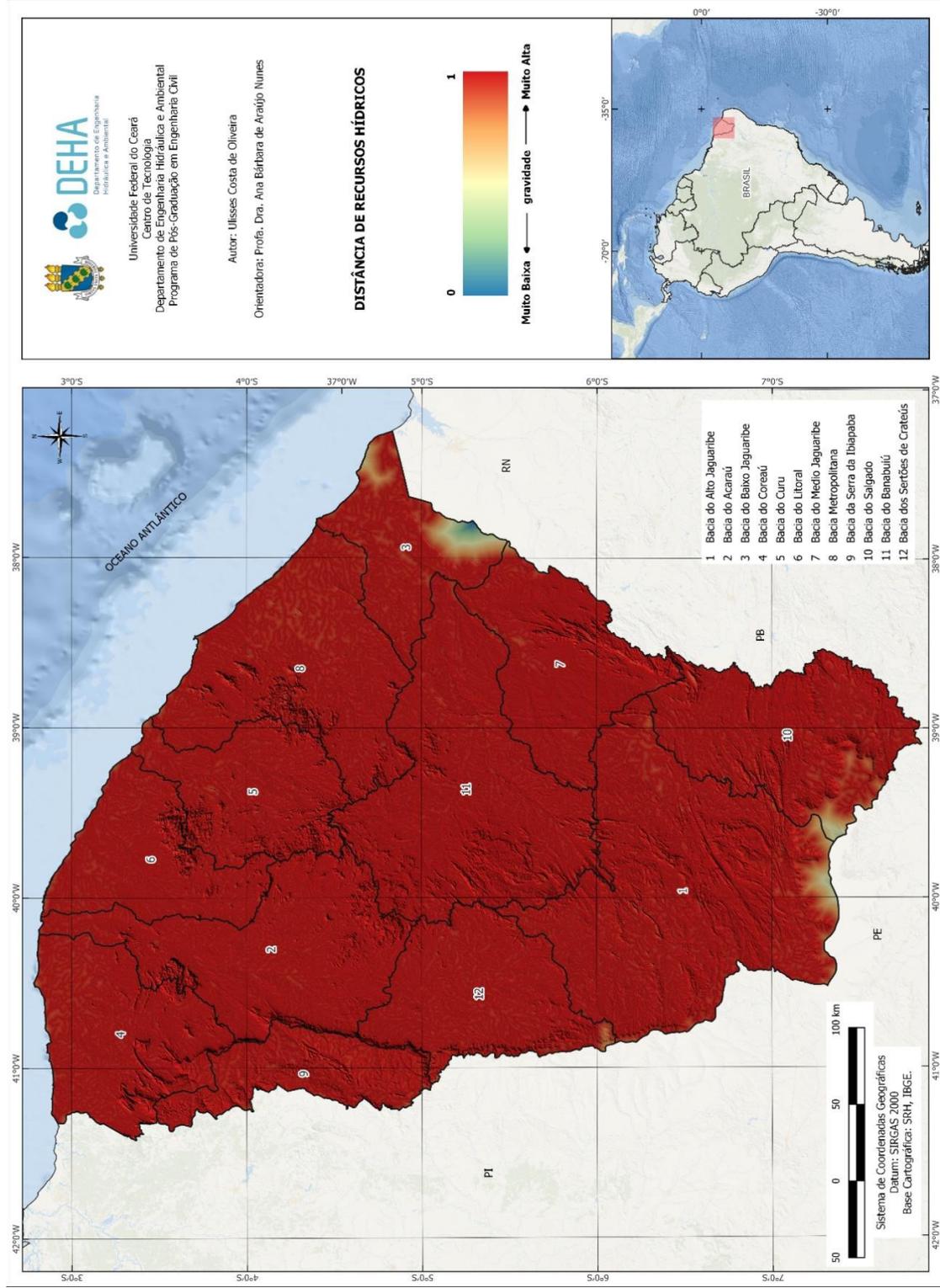
DEHA
Departamento de Engenharia
Hidráulica e Ambiental

Universidade Federal do Ceará
Centro de Tecnologia
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

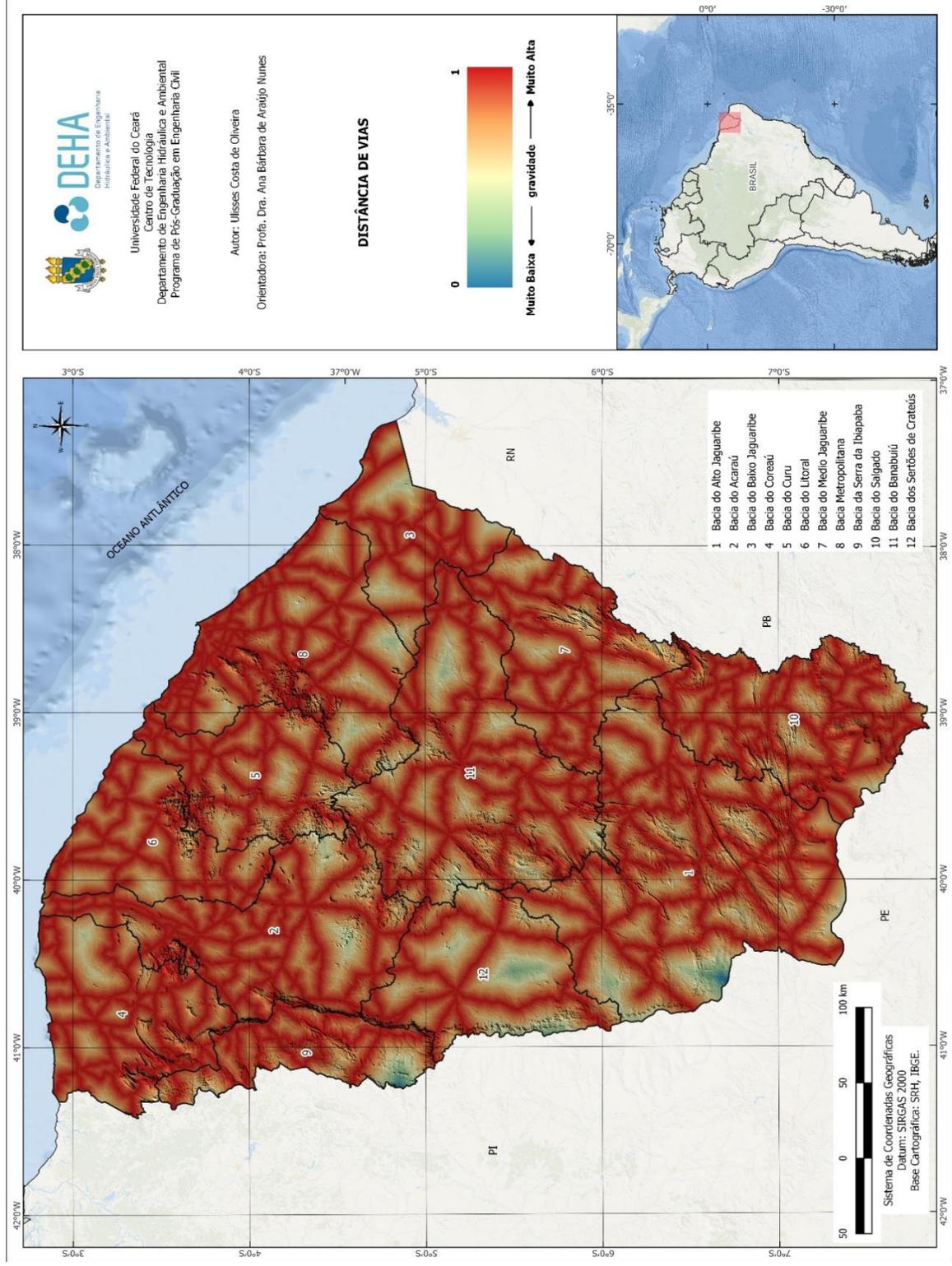
Autor: Ulisses Costa de Oliveira
Orientadora: Profa. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes

BRASIL

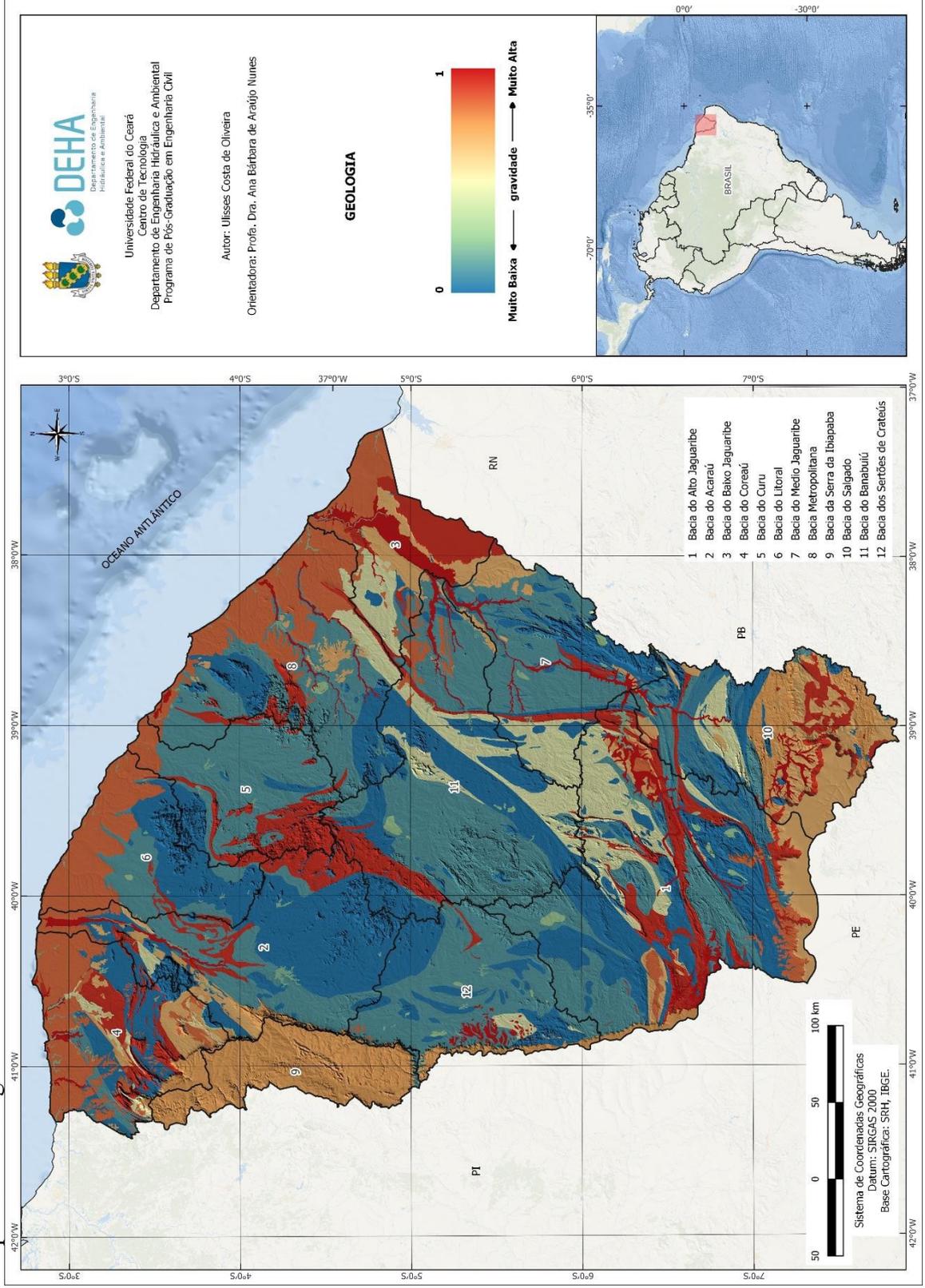
Mapa G3 – Distância de recursos hídricos



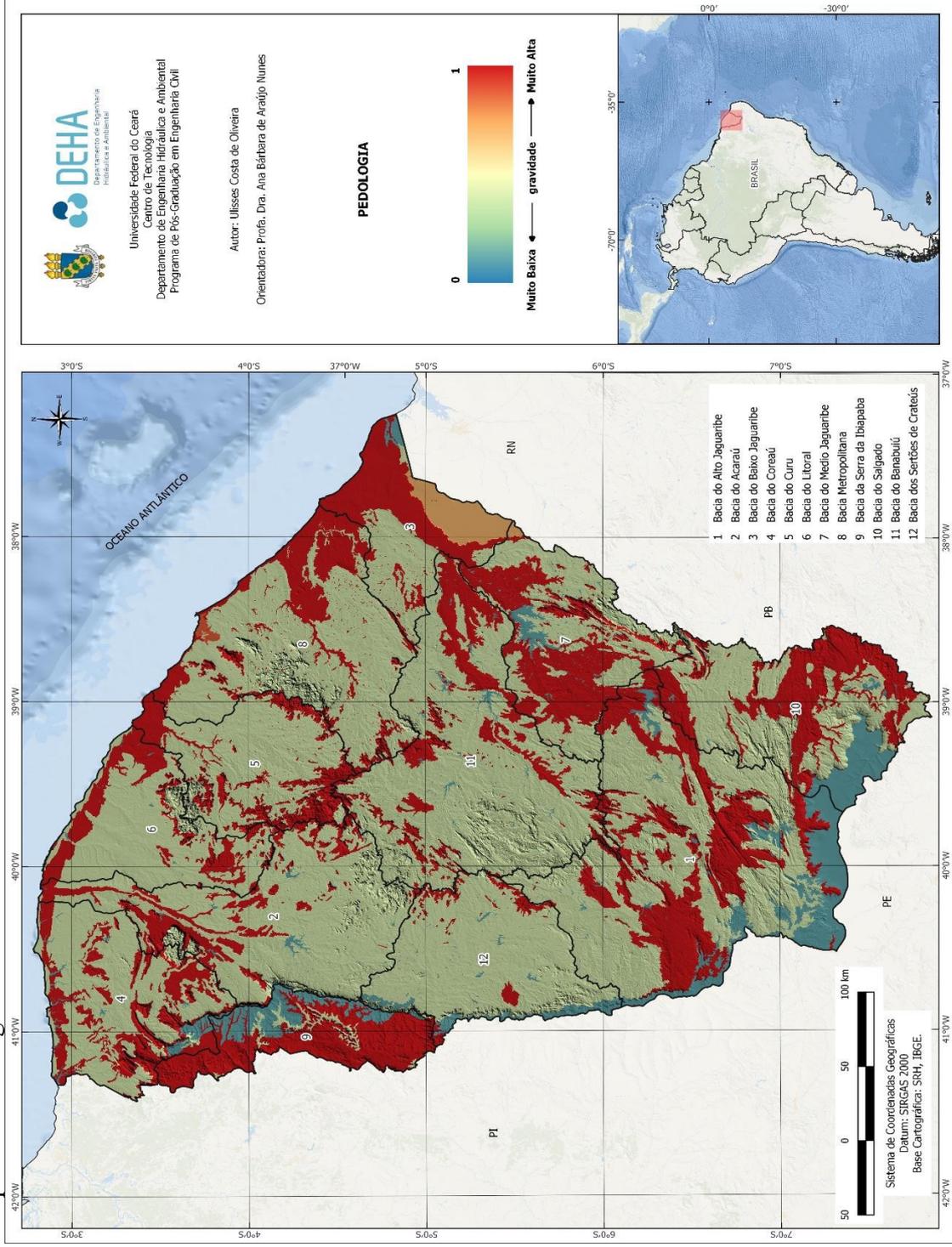
Mapa G4 – Distância de vias



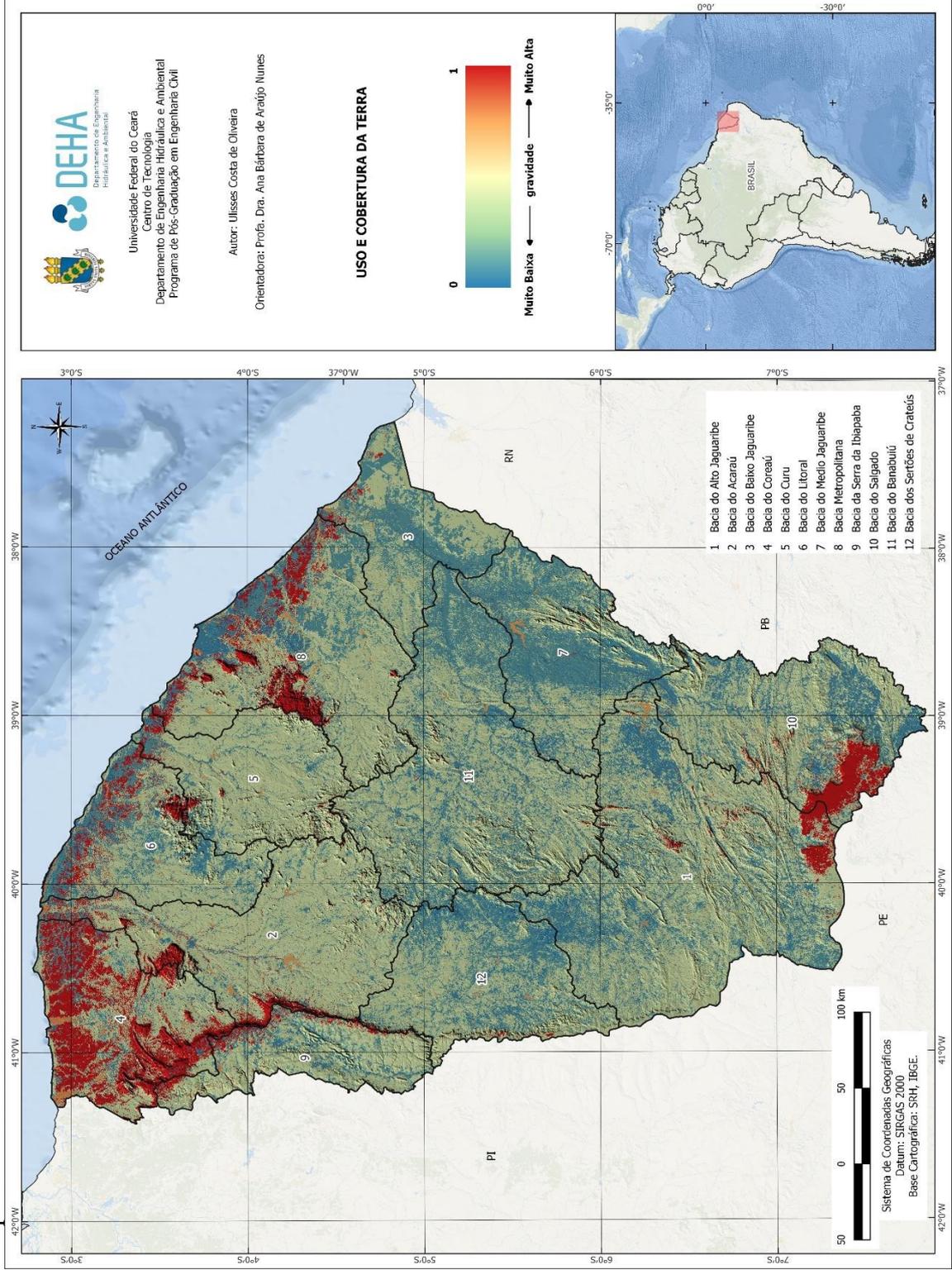
Mapa G5 – Geologia



Mapa G6 –Pedologia



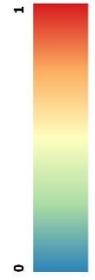
Mapa G7 – Uso e cobertura da terra



Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
 Universidade Federal do Ceará
 Centro de Tecnologia
 Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Autor: Ulisses Costa de Oliveira
 Orientadora: Profa. Dra. Ana Bárbara de Araújo Nunes

USO E COBERTURA DA TERRA



Muito Baixa ← gravidade → Muito Alta

