



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
E GESTÃO DE RECURSOS NATURAIS - PPGEGRN



TESE DE DOUTORADO

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE EM PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE TRECHO DA BR-230 NO ESTADO DA PARAÍBA

ALAN BARBOSA CAVALCANTI

ORIENTADOR: PROF. DR. MADSON TAVARES SILVA

CAMPINA GRANDE - PB
NOVEMBRO, 2023

TESE DE DOUTORADO

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE EM PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE TRECHO DA BR-230 NO ESTADO DA PARAÍBA**

ALAN BARBOSA CAVALCANTI

ORIENTADOR:

Prof. Dr. MADSON TAVARES SILVA

CAMPINA GRANDE - PB

NOVEMBRO, 2023

ALAN BARBOSA CAVALCANTI

**DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE EM PAVIMENTOS
RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE TRECHO DA BR-230 NO ESTADO DA PARAÍBA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Naturais

Subárea: Modelagem Ambiental

CAMPINA GRANDE - PB

NOVEMBRO, 2023

- C376d Cavalcanti, Alan Barbosa.
Determinação do índice de vulnerabilidade em pavimentos rodoviários: estudo de trecho da BR-230 no Estado da Paraíba / Alan Barbosa Cavalcanti – Campina Grande, 2023.
160 f. : il. color.
- Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2023.
"Orientação: Prof. Dr. Madson Tavares Silva."
Referências.
1. Pavimento. 2. Degradação de Pavimentos. 3. Vulnerabilidade de Pavimentos. 4. Índice. 5. Álgebra de Mapas. 6. Análise Fatorial. 7. Rodovias Brasileiras – BR-230. I. Silva, Madson Tavares. II. Título.
- CDU 625.8(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES
ALAN BARBOSA CAVALCANTI

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE TRECHO DA BR-230 NO ESTADO DA PARAÍBA

TESE apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de DOUTOR Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 17 de Novembro de 2023

Dr.(a.) **MADSON TAVARES SILVA** (Orientador PPGEGRN).
Dr.(a.) **PATRICIA HERMINIO CUNHA FEITOSA/PPGEGRN/UF CG** (Examinador Interno).
Dr.(a.) **VIVIANE FARIAS SILVA/PPGEGRN/UF CG** (Examinador Interno).
Dr.(a.) **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES/UAEC/UF CG** (Examinador Externo).
Dr.(a.) **JOÃO HUGO BARACUY DA CUNHA CAMPOS/UEPB** (Examinador Externo).



Documento assinado eletronicamente por **MADSON TAVARES SILVA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/11/2023, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VIVIANE FARIAS SILVA, VICE-COORDENADOR**, em 27/11/2023, às 15:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Hugo Baracuy da Cunha Campos, Usuário Externo**, em 28/11/2023, às 11:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **PATRICIA HERMINIO CUNHA FEITOSA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/11/2023, às 19:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOHN KENNEDY GUEDES RODRIGUES, PROFESSOR 3 GRAU**, em 30/11/2023, às 08:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **3892226** e o código CRC **90B2A4F2**.

*“Eu lhes disse essas coisas para que em mim vocês tenham paz.
Neste mundo vocês terão aflições; contudo, tenham ânimo!
Eu venci o mundo.”*

João 16:33

DEDICATÓRIA

A Deus,

pela força e proteção concedidas, sou grato pelo privilégio da transformação e crescimento de vida espiritual em Cristo, onde, tenho certeza, que todas as adversidades enfrentadas avançaram rumo à maturidade.

A meus pais,

Dagmar e Josenaldo, por todos os ensinamentos, preocupações e dedicação na formação da minha personalidade, sempre objetivando em tornar-me um indivíduo digno, de bom caráter e capaz de respeitar a todos independente das circunstâncias.

A Katieli Maria,

pelo companheirismo, respeito, carinho e amor com que tratou toda a nossa história, onde, em comum propósito, sempre esteve presente ajudando a superar todos os obstáculos.

A todos os colegas e amigos da UEPB, da UFCG e da vida,

por se fazerem presentes em diferentes momentos, ajudando diretamente e indiretamente, tornando, assim, essa jornada mais leve e prazerosa.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Prof. Dr. Madson Tavares Silva, por acreditar no meu trabalho, pelos ensinamentos, pela construção da proposta metodológica desse projeto, orientando de verdade em todos os momentos e construindo uma amizade que pretendo levar por toda a vida.

Ao Professor Dr. John Kennedy Guedes Rodrigues do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Campina Grande, pelo apoio na obtenção dos dados junto a Superintendência Regional do DNIT do estado da Paraíba.

Ao professor Dr. João Hugo Baracuy da Cunha Campos do Curso de Licenciatura em Física da Universidade Estadual da Paraíba, por acreditar no meu potencial, apresentar-me ao meu orientador e apoiar esse trabalho desde o início.

Aos membros da banca examinadora, pela paciência e dedicação na colaboração em prol do aprimoramento desse trabalho.

A Universidade Estadual da Paraíba, pela autorização do afastamento das minhas atividades como docente, afim de fornecer o ambiente propício para realização desta pesquisa.

Ao curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, por entender que o meu afastamento e aprimoramento é de suma importância para o crescimento e desenvolvimento do curso.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande bem como seus estimados docentes, pela estrutura e manutenção das atividades online mesmo em meio a um cenário delicado regido pela pandemia da Covid-19.

De maneira geral, agradeço a todos que de alguma forma colaboraram para que eu pudesse cumprir com mais uma etapa da minha vida acadêmica e profissional.

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	XI
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS	XV
RESUMO	XVIII
ABSTRACT	XIX
1. INTRODUÇÃO	20
2. OBJETIVOS	24
2.1. Geral.....	24
2.2. Específicos.....	24
3. REVISÃO DE LITERATURA	25
3.1 Degradação de pavimentos flexíveis associados ao clima.....	25
3.2 Vulnerabilidade ambiental.....	33
3.3 Geoprocessamento aplicado a vulnerabilidade ambiental.....	40
3.3.1 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	46
3.3.2 Dados meteorológicos.....	48
3.3.3 Dados espaciais de natureza contínua em SIG.....	49
3.3.4 Álgebras de mapas.....	50
3.3.5 Análise estatística multivariada de dados.....	51
4. MATERIAL E MÉTODOS	53
4.1 Área de estudo.....	53
4.1.1 Clima.....	54
4.1.2 Geologia.....	56
4.1.3 Relevo.....	57
4.1.4 Solos.....	58
4.1.5 Vegetação.....	59
4.1.6 Dados socioeconômicos.....	60
4.2 Descrição das etapas do trabalho.....	62
4.3 Obtenção de dados.....	62
4.4 Classificação da vulnerabilidade.....	63
4.4.1 Geomorfologia.....	63
4.4.2 Geologia.....	65
4.4.3 Uso e ocupação do solo.....	66
4.4.4 Drenagem.....	68
4.4.5 Modelo digital de elevação do terreno.....	68
4.4.6 Precipitação pluviométrica.....	70
4.4.7 Declividade (Slope).....	72
4.4.8 Solos e Textura.....	73
4.5 Álgebra de mapas para cálculo do IVP.....	75
4.6 Níveis de vulnerabilidade do IVP.....	76
4.7 Avaliação de Pavimentos.....	77
4.7.1 Levantamento Visual Contínuo (LVC).....	77
4.7.2 Índice de Gravidade Global (IGG).....	78
4.7.3 Irregularidade Longitudinal.....	80
4.7.4 Falling Weight Deflectometer (FWD).....	81
4.7.5 Divisão de Segmentos Homogêneos.....	85
4.8 Análise Fatorial.....	87

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1 Geomorfologia.....	90
5.2 Geologia.....	93
5.3 Uso e ocupação do solo.....	99
5.4 Drenagem.....	102
5.5 Modelo digital de elevação do terreno.....	105
5.6 Precipitação pluviométrica.....	108
5.7 Declividade (Slope).....	111
5.8 Pedologia.....	114
5.9 Textura.....	117
5.10 Índice Vulnerabilidade de Pavimentação a partir da álgebra de mapas.....	119
5.11 Avaliação de Pavimentos.....	122
5.12 Análise fatorial.....	128
6. CONCLUSÕES	138
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXOS	156

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Exemplo de uma seção transversal de um pavimento flexível. Fonte: Viana (2015).	25
Figura 2. Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via. Fonte: Bernucci et al. (2007).	28
Figura 3. Alguns tipos dos defeitos de superfície do pavimento. Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2007).	31
Figura 4. Homem como modificador da paisagem natural. Fonte: Santos (2007).	34
Figura 5. Estrutura de vulnerabilidade: Componentes de vulnerabilidade identificados e ligados a fatores além do sistema de estudo e operando em várias escalas. Fonte: Adaptado de Turner et al. (2003).	38
Figura 6. Sistema de índice de avaliação de vulnerabilidade rodoviária em regiões frias. Fonte: Adaptado de Wang et al. (2021).	39
Figura 7. Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica. Fonte: Câmara et al. (2001).	42
Figura 8. Localização da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	53
Figura 9. Mapa de climas da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	55
Figura 10. Mapa de climas zonais da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	56
Figura 11. Domínio geológico da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	57
Figura 12. Biomas da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	59
Figura 13. Vegetação da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	60
Figura 14. Uso e ocupação socioeconômicos da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).	61
Figura 15. Fluxograma das etapas do trabalho. Fonte: próprio Autor.	62
Figura 16. Postos pluviométricos da área de estudo. Fonte: próprio Autor.	71
Figura 17. Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos (Figura 18a). Treliça metálica para medida dos afundamentos em trilhas de roda (Figura 18b). Fonte: Bernucci et al. (2022).	79
Figura 18. Sistema medidor do tipo resposta SMITR instalado no veículo. Fonte: Adaptado de ANTT (2017).	81
Figura 19. Vista geral de um modelo de FWD existente no país (Figura 20a). Desenho esquemático do FWD e representação fora de escala da bacia de deflexão (Figura 20b). Fonte: Bernucci et al. (2022).	82
Figura 20. Exemplo gráfico da divisão dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO (1993). Fonte: Bernucci et al. (2022).	86
Figura 21. Mapa das ocorrências geomorfológicas. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	90
Figura 22. Mapa de vulnerabilidade da geomorfologia. Fonte: próprio Autor.	92
Figura 23. Mapa das ocorrências geológicas. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	94
Figura 24. Mapa de vulnerabilidade da geologia. Fonte: próprio Autor.	98
Figura 25. Mapa de Uso e Ocupação do Solo. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	100
Figura 26. Mapa de vulnerabilidade para uso e ocupação do solo. Fonte: próprio Autor.	101
Figura 27. Mapa de drenagem. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	103
Figura 28. Mapa de vulnerabilidade da drenagem. Fonte: próprio Autor.	104
Figura 29. Distribuição espacial da altimetria na área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	106
Figura 30. Mapa de vulnerabilidade do MDE. Fonte: próprio Autor.	107
Figura 31. Variabilidade geoespacial da distribuição pluviométrica da área de estudo. Fonte: próprio	109

Autor.	
Figura 32. Mapa da composição pluviométrica. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	109
Figura 33. Mapa de vulnerabilidade da intensidade pluviométrica. Fonte: próprio Autor.	110
Figura 34. Mapa de declividade. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	112
Figura 35. Mapa de vulnerabilidade a declividade. Fonte: próprio Autor.	113
Figura 36. Mapa de composição pedológica. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	114
Figura 37. Mapa de vulnerabilidade a composição pedológica. Fonte: próprio Autor.	116
Figura 38. Mapa de textura do solo. Fonte: Adaptado IBGE (2021).	117
Figura 39. Mapa de vulnerabilidade a textura do solo. Fonte: próprio Autor.	119
Figura 40. Mapa do Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos. Fonte: próprio Autor.	121
Figura 41. Divisão dos segmentos homogêneos do trecho da área de estudo pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO (1993). Fonte: próprio Autor.	123
Figura 42. Mapa da divisão dos segmentos homogêneos do trecho da área de estudo. Fonte: próprio Autor.	124
Figura 43. Resumo dos resultados da avaliação funcional e estrutural. Fonte: próprio Autor.	126
Figura 44. Divisão dos segmentos homogêneos no mapa do IVP a partir da álgebra de mapas. Fonte: próprio Autor.	127
Figura 45. Scree plot: Curva da variância individual de cada fator. Fonte: próprio Autor.	131
Figura 46. Cargas fatoriais (eixos F1 e F2: 50,32%). Fonte: próprio Autor.	133
Figura 47. Mapa de vulnerabilidade do fator D1 normalizado. Fonte: próprio Autor.	135
Figura 48. Mapa de vulnerabilidade do fator D2 normalizado. Fonte: próprio Autor.	136
Figura 49. Mapa de vulnerabilidade do fator D3 normalizado. Fonte: próprio Autor.	137

LISTA DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Valores de vulnerabilidade associados às classes geomorfológicas	64
Tabela 2. Valores de vulnerabilidade associados às classes de geologia	66
Tabela 3. Valores de vulnerabilidade associados às classes de uso e ocupação do solo	67
Tabela 4. Valores de vulnerabilidade associados às classes de densidade de drenagem	68
Tabela 5. Valores de vulnerabilidade associados às classes de da vulnerabilidade referente a amplitude altimétrica	70
Tabela 6. Valores de vulnerabilidade associados às classes de intensidade pluviométrica	72
Tabela 7. Valores de vulnerabilidade associados às classes de declividade	73
Tabela 8. Valores de vulnerabilidade associados às classes de solo	75
Tabela 9. Valores de vulnerabilidade associados às classes de textura do solo	75
Tabela 10. Escala de vulnerabilidade para pavimentação	77
Tabela 11. Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG	80
Tabela 12. Classificação de irregularidade superficial	81
Tabela 13. Valor do coeficiente Z para definição da deflexão característica	83
Tabela 14. Valores de Dadm para diferentes valores de número N	84
Tabela 15. Critérios para avaliação estrutural	85
Tabela 16. Distribuição percentual para o tema geomorfologia	91
Tabela 17. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema geomorfologia	92
Tabela 18. Distribuição percentual para o tema geologia	95
Tabela 19. Distribuição percentual do domínio geológico	96
Tabela 20. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema geologia	99
Tabela 21. Distribuição percentual para o tema uso e ocupação do solo	100
Tabela 22. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema uso e ocupação do solo	101
Tabela 23. Distribuição percentual para o tema drenagem	103
Tabela 24. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema drenagem	104
Tabela 25. Distribuição percentual para o MDE	106
Tabela 26. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o MDE	107
Tabela 27. Distribuição percentual da vulnerabilidade da precipitação pluviométrica.	111
Tabela 28. Distribuição percentual para a declividade	112
Tabela 29. Distribuição percentual da vulnerabilidade para a declividade	113
Tabela 30. Distribuição percentual para a composição pedológica	115
Tabela 31. Distribuição percentual da vulnerabilidade para composição pedológica	117
Tabela 32. Distribuição percentual para a textura do solo	118
Tabela 33. Distribuição percentual da vulnerabilidade para textura	119
Tabela 34. Estatística descritiva dos dados	120
Tabela 35. Tabela de percentis	120
Tabela 36. Distribuição territorial espacial dos níveis do IVP	121

Tabela 37. Classificação de irregularidade superficial	123
Tabela 38. Valores característicos de Deflexão e IRI para cada segmento	124
Tabela 39. Raios de curvatura e critério de avaliação estrutural para cada segmento	125
Tabela 40. IGG e conceito obtido para cada segmento homogêneo	126
Tabela 41. Resumo dos resultados da avaliação funcional e estrutural	126
Tabela 42. Estatística Descritiva das variáveis	128
Tabela 43. Matriz de Correlação	129
Tabela 44. Kaiser-Meyer-Olkin: medida de adequação da amostragem	130
Tabela 45. Eigenvalues e a variância acumulada	130
Tabela 46. Fatores extraídos e comunalidades associadas	132
Tabela 47. Matrix e Porcentagem de variância após a rotação Varimax	134
Tabela 48. Variáveis e fatores após a rotação Varimax	134

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACP	Análise de Componentes Principais
AESA	Agência Executiva de Gestão das Águas
AF	Análise Fatorial
AHP	Analytic Hierarchy Process
ALC	Afundamento Local de Consolidação
ALP	Afundamento Local Plástico
ATC	Afundamento da Trilha de Consolidação
ATP	Afundamento da Trilha Plástico
AM	Amazonas
APP	Área de Preservação Permanente
BDiA	Banco de Dados de Informações Ambientais
BR	Brasil
CA	Concreto Asfáltico
CAP	Cimento Asfáltico de Petróleo
CNPM	Conselho Nacional do Ministério Público
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CPs	Corpos de Prova
D	Desgaste
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E	Escorregamento
EGM96	Earth Gravity Model 1996
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EX	Exsudação
FAO	Food and Agriculture Organization
FC-1	Fenda Classe 1
FC-2	Fenda Classe 2
FC-3	Fenda Classe 3
FI	Fissura
FP	Fator de Ponderação
FV	Fatores de Veículos
FWD	Falling Weight Deflectometer

GIS	Geographic Information System
GPS	Global Positioning System
HGT	Height
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICPF	Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis
IDHM	Índice de Desenvolvimento Humano Municipal
IGG	Índice de Gravidade Global
IGGE	Índice do Estado da Superfície
IGI	Índice de Gravidade Individual
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPR	Instituto de Pesquisas em Transportes
IRI	International Roughness Index
IVAS	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo
IVP	Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos
IVSA	Índice de Vulnerabilidade Socioeconômica e Ambiental
J	Trinca tipo “Jacaré”
JE	Trinca tipo “Jacaré” com Erosão
KMO	Kaiser-Meyer-Olkin
LVC	Levantamento Visual Contínuo
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MG	Minas Gerais
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NGA	National Geospatial-Intelligence Agency
O	Ondulação
P	“Painéis”
PB	Paraíba
PBMC	Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas
PCG	Prensa de Cisalhamento Giratória
PI	Piauí
PIB	Produto Interno Bruto
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PRO	Procedimento

QI	Quociente de Irregularidade
R	Remendo
RBNSC	Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo
SC	Santa Catarina
SEEG/OC	Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa do Observatório do Clima
SENAT	Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte
SEST	Serviço Social do Transporte
SH	Segmento Homogêneo
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	Sistemas de Informações Geográficas
SMITR	Sistema Medidor de Irregularidade Tipo Resposta
SOS	Save Our Souls / Save Our Ship
SP	São Paulo
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TB	Trinca em Bloco
TBE	Trinca em Bloco com Erosão
TER	Terminologias
TLC	Trinca Longitudinal Curta
TLL	Trinca Longitudinal Longa
TM	Thematic Mapper
TRE	Trilha de Roda Externa
TRI	Trilha de Roda Interna
TRR	Trinca de Retração
TTC	Trinca Transversal Curta
TTL	Trinca Transversal Longa
UC	Unidades de Conservação
USACE	United States Army Corps of Engineers
USGS	United States Geological Survey
USP	Universidade Federal de São Paulo
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VMD	Volume Médio Diário
VSA	Valor de Serventia Atual
WGS84	World Geodetic System 1984

DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE EM PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE TRECHO DA BR-230 NO ESTADO DA PARAÍBA

RESUMO

De acordo com o Boletim Estatístico da 25ª edição da Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de 2022, 66% das rodovias brasileiras têm algum tipo de problema quanto ao seu estado geral. O processo de degradação dos pavimentos provem de fatores como tráfego, condições climáticas, processos construtivos, drenagem, estrutura, materiais, manutenção adotada, entre outros. Dessa forma, com base no conceito de Ecodinâmica, é importante entender que os fatores de deterioração dos pavimentos podem, também, sofrer grande influência do meio que se encontra. Nesse trabalho foi possível determinar um Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos (IVP) na rodovia BR-230, trecho Campina Grande/PB-João Pessoa/PB, bem como identificar regiões com maior vulnerabilidade de redução da vida útil do pavimento a partir da técnica de álgebra de mapas sobrepondo as seguintes classes: Geomorfologia, Cobertura, Drenagem, Geologia, Modelo Digital de Elevação (MDE), Precipitação, Declividade, Solos e Textura de solos. O IVP foi comparando com resultados obtidos de estudos funcionais e estruturais da rodovia e, além disso, foi computado o grau de contribuição de cada dimensão da vulnerabilidade do pavimento a partir de análise multivariada. Na região estudada observou-se cerca de 50% da área com algum nível de estabilidade e pouco mais de 49% com um certo risco de vulnerabilidade. Dos 5 segmentos homogêneos (SH) determinados para o trecho, o SH1 foi bem avaliado de forma funcional e estrutural apresentando-se distribuído numa área de baixa vulnerabilidade. O SH2, teve baixa avaliação funcional e estrutural além de estar localizado numa área de alta vulnerabilidade. Após a Análise Fatorial, os fatores demonstraram forte influência da Precipitação, do MDE, da Declividade e da Geologia na variabilidade dos dados da área de estudo. A construção de mapas temáticos é uma ferramenta de grande importância na orientação do estudo de vulnerabilidade voltado para a degradação de pavimentos, bem como o índice é um significativo instrumento com o poder de ajudar os órgãos responsáveis nos projetos de pavimentação afim de torna-los mais eficazes quanto as condições climáticas e as ações antrópicas.

Palavras-Chave: Pavimento; Degradação; Vulnerabilidade; Índice; Álgebra de Mapas; Análise Fatorial.

**DETERMINATION OF THE VULNERABILITY INDEX IN ROAD PAVEMENTS:
STUDY OF A SECTION OF BR-230 IN THE STATE OF PARAÍBA ABSTRACT**

ABSTRACT

According to the Statistical Bulletin of the 25th edition of the 2022 National Transport Confederation (CNT) Survey, 66% of Brazilian highways have some type of problem regarding their general condition. The pavement degradation process comes from factors such as traffic, climatic conditions, construction processes, drainage, structure, materials, adopted maintenance, among others. Therefore, based on the concept of Ecodynamics, it is important to understand that the deterioration factors of pavements can also be greatly influenced by the environment in which they are located. In this work, it was possible to determine a Pavement Vulnerability Index (IVP) on the BR-230 highway, Campina Grande/PB-João Pessoa/PB section, as well as identify regions with greater vulnerability to reducing the useful life of the pavement using the map algebra overlaying the following classes: Geomorphology, Cover, Drainage, Geology, Digital Elevation Model (DEM), Precipitation, Slope, Soils and Soil texture. The IVP was compared with results obtained from functional and structural studies of the highway and, in addition, the degree of contribution of each dimension of pavement vulnerability was computed based on multivariate analysis. In the region studied, around 50% of the area was observed to have some level of stability and just over 49% to have a certain risk of vulnerability. Of the 5 homogeneous segments (SH) determined for the stretch, SH1 was well evaluated in a functional and structural way, being distributed in an area of low vulnerability. SH2 had a low functional and structural assessment in addition to being located in an area of high vulnerability. After Factor Analysis, the factors demonstrated a strong influence of Precipitation, MDE, Slope and Geology on the variability of data in the study area. The construction of thematic maps is a tool of great importance in guiding the vulnerability study aimed at pavement degradation, as well as the index is a significant instrument with the power to help the bodies responsible for paving projects in order to make them more effective in terms of climatic conditions and anthropogenic actions.

Keywords: Pavement; Degradation; Vulnerability; Index; Map Algebra; Factor analysis.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente o Brasil tem o modal rodoviário como seu principal meio de transporte, sendo este responsável por 61% da movimentação de mercadorias e 95% do fluxo de passageiros, evidenciando a importância da infraestrutura rodoviária para o desenvolvimento econômico do país e para a garantia de direitos fundamentais dos seus cidadãos (CNT 2019).

De acordo com o Boletim Estatístico da 25ª edição da Pesquisa da Confederação Nacional do Transporte (CNT) de 2022, divulgada pelo SEST SENAT, a qualidade da malha rodoviária brasileira piorou no último ano e encontra-se em condições insatisfatórias aos usuários, quanto ao desempenho, segurança e economia. Em 2022, um total de 110.333km de rodovias foram avaliados pela CNT em todo o país, desse total, 72.763km (66%) têm algum tipo de problema nas condições do Estado Geral, ou seja, numa análise conjunta das características do pavimento da sinalização e da geometria da via, sendo classificados 6,5% (7.157km) em estado péssimo, 18,8% (20.696km) ruim, 40,7% (44.910km) regular, 25,5% (28.149km) bom e apenas 8,5% (9.421km) em estado ótimo. O resultado do Brasil no Índice de Competitividade Global de 2019, na avaliação de 141 países, foi a 93ª posição no ranking de competitividade das rodovias, atrás de países da América do Sul, como Chile (16ª), Argentina (47ª), Uruguai (54ª) e Equador (63ª).

A modelagem do processo evolutivo da degradação oferecida por estruturas de pavimentos exige o entendimento claro de como os principais mecanismos de deterioração se originam e se desenvolvem sob a ação das cargas do tráfego e das variações climáticas, tais como: deflexões, tensões, deformações, tensões térmicas, teor de umidade e temperatura (Gonçalves, 2002). Segundo o autor, tal entendimento é dificultado devido à complexidade presente na estimativa do comportamento futuro da estrutura de pavimento, pois este depende de uma série de fatores, tais como tráfego, condições climáticas, processos construtivos, condições de drenagem, tipo de estrutura, materiais de construção e política de manutenção adotada. As condições climáticas contribuem para a antecipação da deterioração do pavimento tendo em vista que a água da chuva pode provocar queda da capacidade de suporte e a temperatura pode afetar o comportamento do revestimento provocando envelhecimento precoce. Os efeitos são danos estruturais e superficiais ocasionados a partir da associação com as cargas do tráfego, como trincas de superfície que facilitam ainda mais a entrada de água (Bernucci et al., 2022).

De acordo com Gonçalves (2002) as respostas de um pavimento flexível quando submetido as cargas do tráfego são significativamente influenciadas e acumuladas no subleito que por sua vez é altamente sugestionado pelas variações de umidade e de

temperatura. Para uma verificação adequada do subleito é necessário que sejam efetuadas considerações acerca da variação das propriedades do solo ao longo do pavimento e ao longo do tempo, analisando o efeito da sazonalidade e da variação climática. Os modelos de desempenho estabelecidos a partir dos estudos realizados na pista experimental da AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) e de outros estudos conduzidos sob condições similares não são, em geral, diretamente aplicáveis a pavimentos em outras áreas devido a diferenças relativas, dentre outros fatores, as condições climáticas do local. Segundo o autor, no Brasil, com condições climáticas diferentes daquelas da pista experimental construída em Illinois, os resultados empíricos derivados dos ensaios da AASHTO precisam ser cuidadosamente interpretados.

Dentro desse contexto é importante entender que os fatores de deterioração dos pavimentos podem, também, sofrer grande influência do meio que se encontra. Essa relação é possível de ser explicada através do conceito de ecodinâmica proposto por Tricart (1977). Para o autor, o conceito de ecodinâmica indica um modelo de avaliação integrado das unidades territoriais, com base no balanço pedogênese/morfogênese, propiciando sua classificação quanto aos graus de instabilidade. O conceito assume que as trocas de energia e matéria na natureza se processam em relações de equilíbrio dinâmico. Assim, as áreas em que prevalecem os processos morfogenéticos são entendidas como instáveis, enquanto que aquelas nas quais predomina a pedogênese são consideradas estáveis, sob a perspectiva da ecodinâmica; já quando há equilíbrio entre os dois processos, a área é considerada de estabilidade intermediária. As Unidades Ecodinâmicas foram classificadas por Tricart (1977) em três categorias: meios estáveis, meios intergrades e meios fortemente instáveis, propondo a representação dessas unidades da paisagem com a Carta Ecodinâmica (apud Silveira; Fiori; Oka-Fiori, 2005).

De acordo com Barbosa (2020) a degradação da paisagem natural pode prejudicar o uso dos recursos naturais renováveis pelo conjunto de processos que atuam sobre ela, podendo ser por origem natural e também por fatores antrópicos, oriundos do uso e ocupação inadequada do solo. O conhecimento holístico das propriedades geomorfológicas tem se destacado como um importante instrumento no planejamento ambiental das regiões que possuem potencial degradante, uma vez que esses dados servem de suporte na análise das melhores formas de uso da área na perspectiva socioambiental.

A vulnerabilidade ambiental é o grau em que um sistema é suscetível e incapaz de lidar com os efeitos adversos da mudança do clima, inclusive variabilidade climática e os extremos. Essa vulnerabilidade é uma função do caráter, magnitude e taxa de mudança do clima e da variação que um sistema está exposto, sua sensibilidade e sua capacidade de

adaptação (PBMC, 2013). Segundo Cunha et al. (2015) as vulnerabilidades ambientais provocadas pelas mudanças climáticas refletem o potencial de degradação em uma região como respostas a qualquer alteração dos padrões e processos, onde o emprego de um sistema de indicadores representativo dos fenômenos é capaz de apontar vulnerabilidades no espaço analisado, diferenciando as regiões segundo o grau relativo de maior ou menor fragilidade, refletindo possíveis alterações nos diferentes componentes do meio. Mendonça et al. (2022), com base em fatores ambientais que por sua vez determinam a vulnerabilidade natural do terreno, realizaram uma análise de decisão multicritério espacial que permitiu a projeção dos cenários capaz de criar um consenso para as perspectivas de conservação florestal e adequação agrícola.

A evolução dos sistemas de informações geográficas (SIG) facilitaram a seleção e cruzamento de diferentes variáveis consideradas relevantes na análise ambiental, permitindo maior agilidade na integração de dados e na geração de resultados (Filho et al., 2018). Os critérios para atribuição da vulnerabilidade para os temas: Geologia, Geomorfologia, Solos, Precipitação e Vegetação, foram determinados por Crepani et al., (2001), segundo o qual, para se analisar a vulnerabilidade ambiental de uma unidade de paisagem é necessário conhecer sua gênese, constituição física, forma e estágio de evolução, bem como o tipo de cobertura vegetal constituinte. De acordo com Silva (2014) a metodologia para elaboração de mapas que subsidiem a análise de vulnerabilidade Natural à Erosão desenvolvida por Crepani et al. (2001) tem como objetivo apoiar o Zoneamento Ecológico-Econômico apoiado no conceito de Ecodinâmica (Tricart, 1977), que define uma relação entre os processos de morfogênese e pedogênese onde ao predominar a morfogênese prevalecem os processos erosivos modificadores das formas de relevo, e ao predominar a pedogênese prevalecem os processos formadores de solos.

Berre et al. (2022), baseados na geração de um conjunto de 62 indicadores combinados em diferentes tipos de índices mapeados por uma interface web-GIS desenvolvida para esse sistema de vulnerabilidade, analisaram a região da Bretanha, localizada no noroeste da França, com o intuito de contribuir para o pensamento estratégico sobre vulnerabilidade sistêmica dos territórios costeiros à erosão e inundações marinhas.

Portanto este trabalho tem por objetivo determinar um índice de vulnerabilidade de pavimentos rodoviários flexíveis na rodovia BR-230 no trecho Campina Grande/PB-João Pessoa/PB, bem como identificar regiões com maior vulnerabilidade de redução da vida útil do pavimento a partir de técnicas de álgebra de mapas. Este índice pretende ajudar a gerir e tomar decisões relativas à concepção de projetos de pavimentos mais eficientes em termos de condições naturais, afim de tornar-se mais uma estratégia de investigação que possa ser

utilizada por autoridades responsáveis na melhoria da qualidade dos pavimentos. Desta forma é possível criar mapas temáticos referentes a atributos capazes de realizar cálculos de vulnerabilidade ambiental em ambiente SIG, comparar os resultados da álgebra de mapas com estudos funcionais e estruturais do pavimento no intuito de corroborarem com o mapa de risco desenvolvido e, por fim, através de análise multivariada, interpretar as variáveis que influenciam, quanto ao processo de degradação, na variabilidade dos dados distribuídos na área de estudo.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Determinar um índice de vulnerabilidade quanto a degradação de pavimentos rodoviários flexíveis na rodovia BR-230 (Trecho Campina Grande/PB-João Pessoa/PB).

2.2. Específicos

- Identificar regiões com maior vulnerabilidade de redução do tempo de vida útil do pavimento a partir de diferentes atributos (Geomorfologia, Cobertura, Drenagem, Geologia, Modelo Digital de Elevação do Terreno, Precipitação, Declividade, Solos e Textura);
- Aplicar as técnicas de álgebra de mapas afim de realizar cálculos de vulnerabilidade ambiental em ambiente SIG para determinação do Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos;
- Comparar os resultados de vulnerabilidade com os estudos funcionais e estruturais da rodovia (avaliações de análise de defeitos superficiais e levantamentos deflectométricos);
- Quantificar o grau de contribuição de cada dimensão da vulnerabilidade do pavimento a partir de análise multivariada.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Degradação de pavimentos flexíveis associados ao clima

De acordo com Bernucci et al. (2007) uma vez que o solo natural não é suficientemente resistente para suportar a repetição de cargas de roda sem sofrer deformações significativas, torna-se necessária a construção de uma estrutura, denominada pavimento, que por sua vez é composto de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, denominada subleito, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança. Os pavimentos asfálticos são aqueles em que o revestimento é composto por uma mistura constituída basicamente de agregados e ligantes asfálticos. É formado por quatro camadas principais: revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito (Figura 1), porém, dependendo do tráfego e dos materiais disponíveis, pode-se ter ausência de algumas camadas.

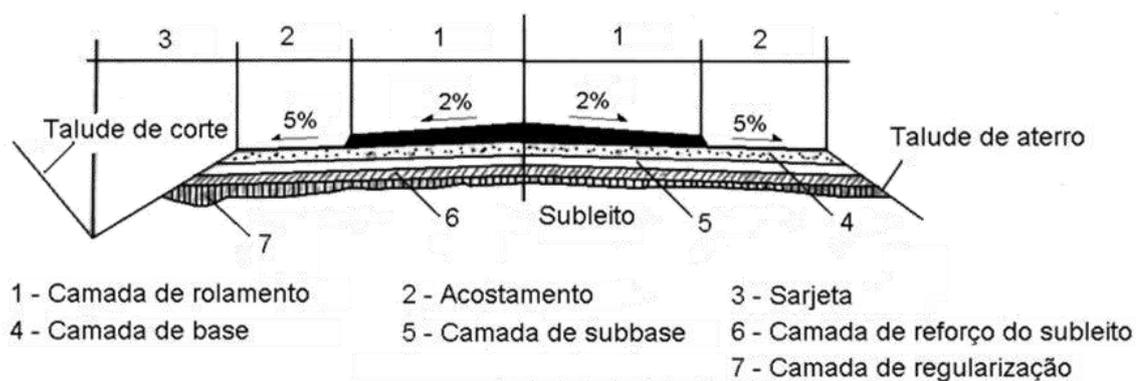


Figura 1. Exemplo de uma seção transversal de um pavimento flexível. Fonte: Viana (2015).

O desempenho adequado do conjunto de camadas e do subleito relaciona-se à capacidade de suporte e à durabilidade compatível com o padrão da obra e o tipo de tráfego, bem como o conforto ao rolamento e a segurança dos usuários. O desafio de projetar um pavimento reside no fato de conceber uma obra de engenharia que cumpra as demandas estruturais e funcionais (Bernucci et al., 2007). As causas da deterioração dos pavimentos podem ser agrupadas em: *Solicitações do tráfego*, associadas à carga por eixo, ao tipo de eixo, ao tipo de rodagem, à pressão de enchimento dos pneus e ao tipo de suspensão; e *Solicitações climáticas*, principalmente variações de temperatura e de umidade (Pessoa, 2012).

Segundo Balbo (2007) os termos *dano*, *deterioração* e *degradação* são nomes possíveis para descrever o processo de perda de qualidade estrutural ou funcional dos pavimentos. Os materiais de construção, no decorrer de sua vida de serviço, apresentam processos de danificação e deterioração (degradação) inevitáveis que, gradualmente alteram suas propriedades mecânicas, ou seja, aquelas que governam seu comportamento sob ações de cargas de diversas naturezas. As propriedades dos materiais alteram-se após a construção, piorando pouco a pouco, sendo sua degradação motivada por cargas de veículos, produtos químicos e ações ambientais, como temperatura e umidade. Balbo (2007) afirma que ao se considerarem os possíveis mecanismos de ruptura em pavimentos, devem se pensar que existem sítios geológicos e pedológicos diversos; diferentes condições climáticas e morfológicas; políticas de cargas para diferentes veículos comerciais em diversos países; utilização de materiais peculiares em cada região do planeta, além de tradições construtivas e de projeto muito variadas.

De acordo com Pereira (2003) o aumento da irregularidade, a desagregação do material superficial e eventualmente ruína do pavimento, são provocados por vários tipos de ações danosas combinadas das mudanças de temperatura e das chuvas, além das tensões e deformações causadas pela solitação do tráfego. A presença de água livre dentro da estrutura associada às solitações das cargas dos veículos são fatores que lideram os danos causados ao pavimento. Quando há excesso de água nos espaços entre camadas sucessivas, ou nos poros, verifica-se, mais rapidamente, ações prejudiciais na estrutura do pavimento. Nas demais camadas do pavimento, o excesso de umidade provoca a redução na capacidade de suporte que quando solicitado pelo tráfego dá origem a afundamentos e panelas que também provocarão danos às suspensões dos veículos.

As alterações momentâneas na resposta estrutural dos pavimentos e principalmente a modificação de características dos materiais, são efeitos da atuação diária e sazonal do clima (radiação solar, precipitação e congelamento), o que resulta na degradação acelerada das estruturas de pavimento. Em relação as zonas de clima temperado do mundo, o clima brasileiro apresenta-se de forma peculiar. Na zona intertropical do Brasil, as temperaturas tem amplitude entre mínimas e máximas anuais de 10°C a 36°C. Na floresta equatorial, há grande volume de precipitação atmosférica, gerando padrões acima de 2.500mm por ano, enquanto, em vários pontos litorâneos próximos à mata atlântica, valores acima de 3.000mm são encontrados, como na Serra do mar, em São Paulo. Valores entre 1.000mm e 1.500mm são bastante comuns na Região Centro-Oeste e restante do país. O litoral nordestino e grande parte da Região Sul possuem maiores índices pluviométricos durante os invernos. Em solos tropicais, em virtude da umidade mais intensa, existe um maior período de duração

de saturação nas camadas, principalmente em vias de fundo de vale, em áreas de drenagem muito precária, danificando as camadas com a presença de afundamentos localizados e bombeamento de finos para camadas granulares. (Balbo, 2007).

As frequentes chuvas de verão em regiões frias podem facilmente levar a inundações e agravar os danos causados pela água ao pavimento, especialmente em áreas com condições geológicas complexas. As instalações de drenagem artificiais de um pavimento afetam diretamente os danos causados pela água, além disso as condições topográficas naturais e os tipos de solos ao longo da rodovia também são fatores atenuantes (Wang et al., 2021).

Em países de clima tropical úmido, durante o verão, não são raros os dias em que após horas de sol forte, com temperaturas elevadas, ocorrem chuvas de grande intensidade. As elevadas temperaturas provocam a redução da viscosidade do ligante asfáltico que associadas com excesso de água aceleram o processo de oxidação e consequente degradação do mesmo. Também pode-se citar o surgimento de panelas na desagregação do Concreto Asfáltico (CA), que é outro efeito danoso causado pela associação de temperaturas elevadas e excesso de água em conjunto com a abrasão provocada pela solicitação do tráfego (Pereira, 2003).

Segundo Gonçalves (1999) para melhor compreensão do nível com que um pavimento atende as exigências mínimas para as quais fora concebido inicialmente, é preciso o entendimento de dois conceitos fundamentais estabelecidos nesse processo: I) *Serventia*: É o grau com que o pavimento atende aos requisitos de conforto ao rolamento e segurança, nas velocidades operacionais da via e em um determinado momento de sua vida de serviço; II) *Desempenho*: É a variação da serventia ao longo do tempo.

O valor de serventia atual (VSA) é uma atribuição numérica compreendida em uma escala de 0 a 5, dada pela média de notas de avaliadores para o conforto ao rolamento de um veículo trafegando em um determinado trecho, em um dado momento da vida do pavimento. O VSA é, em geral, elevado logo após a construção do pavimento, quando bem executado, sendo não encontrada na prática a condição de perfeição, sem qualquer irregularidade (VSA = 5). O VSA do pavimento diminui com o passar do tempo por dois fatores principais: o tráfego e as intempéries (Bernucci et al., 2007). Na Figura 2, a forma da curva de serventia com tempo decorrido de utilização.

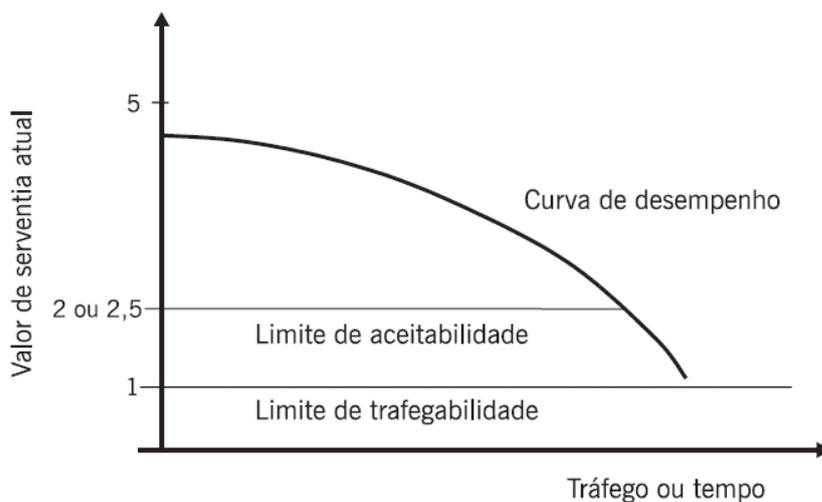


Figura 2. Variação da serventia com o tráfego ou com o tempo decorrido de utilização da via. Fonte: Bernucci et al. (2007).

Para Bernucci et al. (2007), a diminuição da serventia do pavimento está associada ao clima que contribui na aceleração da deterioração do pavimento uma vez que a água da chuva pode provocar queda de capacidade de suporte, assim, a estrutura ao ser solicitada pelo tráfego sofre maiores deslocamentos, provocando maiores danos estruturais e de superfície, como as trincas, que por sua vez facilitam a entrada de água. A evolução dessas trincas acentua o decréscimo do valor de serventia. Além disso, a temperatura também afeta o comportamento dos materiais, ou seja, o aumento da temperatura reduz a viscosidade dos ligantes asfálticos e a resistência das misturas asfálticas às deformações permanentes. Temperaturas muito baixas podem provocar trincamento no revestimento asfáltico por retração e levam ainda ao seu enrijecimento que, se muito delgado, e construído sobre materiais muito deformáveis, fica mais suscetível ao trincamento por fadiga.

Pessoa (2012) afirma que os tipos de defeitos encontrados nos pavimentos sempre têm uma relação direta ou indireta com os modos de ruptura dos materiais de pavimentação, originando as patologias que se manifestam no tempo com características peculiares. Entre vários tipos de rupturas dos pavimentos asfálticos, a *Ruptura por retração hidráulica*, que é o resultado de variações volumétricas na massa, acabando por ocasionar o surgimento de fissuras em sua estrutura interna, e a *Ruptura por retração térmica*, que é consequência das alterações volumétricas dos materiais, em razão de variações de temperatura nas misturas, seja para as cimentadas, como para as asfálticas (Balbo, 2007).

As frações de asfaltenos e de maltenos compõe e desempenham grande importância no produto do Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). Os asfaltenos constituem a parte sólida e concedem rigidez, já os maltenos constituem a parte oleosa e conferem as propriedades

plásticas e de viscosidade. Tais constituintes são susceptíveis a alterações químicas irreversíveis ao longo do emprego do revestimento asfáltico e os fatores externos que mais contribuem para as alterações são de natureza climática, como a radiação solar e chuvas com acidez. Com a ação desses elementos externos, os maltenos por meio de processos químico-orgânicos de natureza complexa, transformam-se em substâncias de natureza similar aos asfaltenos, o que gera um paulatino aumento na rigidez do material, transformando-o em um material mais frágil, quebradiço e muito viscoso (Balbo, 2007).

Simões (2016) ao citar os impactos das alterações climáticas nos pavimentos rodoviários, afirma que o aumento da temperatura provoca a exsudação do ligante, formação de afundamentos, principalmente, quando a temperatura da mistura excede os 45°C, e endurecimento por envelhecimento, o que resulta em desagregação e surgimento de fissuras. Como os ligantes asfálticos são classificados de acordo com o seu desempenho a temperatura, as variações térmicas alteram o comportamento do material. O aumento da temperatura da superfície do pavimento tem como consequência direta o endurecimento da mistura betuminosa o que, acompanhado pela intensificação da radiação ultravioleta, causa uma sobre-elevação da taxa de oxidação, implicando na redução da capacidade de “flexibilidade” da mistura (endurecimento por envelhecimento). A partir daí acontece a diminuição da capacidade de suporte sob o efeito das forças induzidas pelo tráfego, causando fissuras e perda do material por desagregação e tornando o pavimento muito mais susceptível à infiltração da água para as camadas interiores.

Em pesquisa realizada por Wang et al. (2020) sobre a influência das chuvas intensas no pavimento provocados por fenômenos meteorológicos, como aquecimento do clima, tufões, chuvas intensas e inundações urbanas, observam a influência do dano por umidade induzida em relação à dinâmica da pressão da água nos poros no pavimento, que exibe um mecanismo totalmente diferente quando comparado ao dano induzido pela expansão por congelamento ou imersão estática em água. A ocorrência frequente de chuvas intensas, induzidas pelo aquecimento do clima, agrava a influência da pressão dinâmica da água dos poros, o que aumenta o efeito adverso da água na vida útil de pavimento asfáltico.

Ainda sobre os diferentes tipos de degradação do pavimento, Balbo (2007) cita o processo de bombeamento de finos do subleito para estratos superiores do pavimento, que ocorre quando as camadas inferiores de solos se encontram saturadas, sejam por drenagem inadequada do pavimento ou sejam por percolação de água pluvial da superfície para o fundo do pavimento pelas fissuras existentes nas camadas superiores. Esse bombeamento é um tipo de contaminação de materiais de pavimentação, termo aplicável ao fenômeno de impregnação de material fino nos interstícios de grãos do material original. Com a passagem

de cargas sobre o pavimento, nas camadas inferiores (saturadas) fomenta-se a ocorrência do fenômeno de bombeamento de finos, resultante do alívio de pressão neutra na estrutura, com lançamento de água em sentido ascensional. Como consequência primária tem-se a contaminação de bases granulares ou até mesmo a ocorrência de vazios na estrutura do pavimento em virtude da perda de material. O comportamento da estrutura passa a ser atípico com alta deformação, o que gera processo de afundamentos, de fissuração e de degradação que culminam em buracos.

De acordo com a norma DNIT 005/2003 – TER: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos: terminologia, os tipos de defeitos são considerados para cálculo do indicador de qualidade da superfície do pavimento denominado IGG (Índice de Gravidade Global). Bernucci et al. (2007) define os principais tipos de defeitos citados pela norma:

a) *Fendas (F)*: são aberturas na superfície asfáltica e podem ser classificadas como fissuras, quando a abertura é perceptível a olho nu apenas à distância inferior a 1,5m, ou como trincas, quando a abertura é superior à da fissura;

b) *Afundamentos (A)*: derivados de deformações permanentes seja do revestimento asfáltico ou de suas camadas subjacentes, incluindo o subleito;

c) *Corrugações (O)*: são deformações transversais ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros;

d) *Corrugação e ondulações transversais (O)*: as corrugações são deformações transversais ao eixo da pista, em geral compensatórias, com depressões intercaladas de elevações, com comprimento de onda entre duas cristas de alguns centímetros ou dezenas de centímetros. As ondulações são também deformações transversais ao eixo da pista, em geral decorrentes da consolidação diferencial do subleito, diferenciadas da corrugação pelo comprimento de onda entre duas cristas da ordem de metros;

e) *Desgaste (D)*: decorre do desprendimento de agregados da superfície ou ainda da perda de mástique junto aos agregados;

f) *Panela (P)* ou *buraco*: é uma cavidade no revestimento asfáltico, podendo ou não atingir camadas subjacentes.

g) *Escorregamento (E)*: é decorrente de fluência do revestimento asfáltico;

h) *Remendo (R)*: é um tipo de defeito apesar de estar relacionado a uma conservação da superfície e caracteriza-se pelo preenchimento de panelas ou de qualquer outro orifício ou depressão com massa asfáltica.

Na Figura 3, verificam-se alguns tipos de defeitos possivelmente provocados pela associação entre a ação das variações climáticas (diárias e sazonais) e as cargas do tráfego.



a) Trinca de retração térmica



b) Conjunto de trincas longitudinais longas



c) Trincas longitudinais longas



d) Afundamento plástico nas trilhas de roda



e) Afundamento por consolidação em trilha de roda



f) Desagregação



g) Panela atingindo a base



h) Bombeamento de finos



i) Exsudação

Figura 3. Alguns tipos dos defeitos de superfície do pavimento. Fonte: Adaptado de Bernucci et al. (2007).

Para Wang et al. (2021) em regiões frias onde a temperatura média do mês mais frio é $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e 33% dos dias do ano têm uma temperatura média diária abaixo de $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, especialmente no planalto Qinghai-Tibet e na parte norte da província de Heilongjiang na China, o solo congelado amplamente distribuído, as condições de terreno complexas e as características climáticas são os principais fatores que causam danos à infraestrutura de transporte, como deformação do pavimento, deslizamento de terra e fluxo de detritos. Para os autores, os principais fatores de avaliação da exposição do pavimento incluem o clima de temperatura extremamente baixa, clima de temperatura extremamente alta, clima extremamente chuvoso e dias extremamente congelados.

No trabalho de Souza et al. (2020) foi analisada a variação da temperatura superficial em pavimentos com diferentes albedos por meio de sensores de medição superficial com auxílio de imagens termográficas. Foi observado nos resultados que a diferença entre a refletância dos pavimentos foi de 7%, assim, a diferença entre a temperatura superficial do pavimento variou entre 1 a $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, devido a tonalidade, o envelhecimento da superfície e ao desgaste da tinta látex causado pela abrasão dos veículos. A pesquisa de Almeida (2017) abordou a incidência do efeito da água e da temperatura no comportamento reológico e no desempenho mecânico das misturas asfálticas em relação à vida útil do pavimento asfáltico. A ação da água foi avaliada, primeiro, através dos ensaios com imersão em água, e, segundo, a longo prazo, submetendo os Corpos de Prova (CPs) a um prévio condicionamento de ciclos de imersão em água, por 18 horas, e de secagem, por 6 horas, durante 5 ciclos. As misturas foram submetidas a avaliações preliminares nos ensaios da PCG (Prensa de Cisalhamento Giratória), de Lottman Modificado, de Deformação Permanente, seguindo a caracterização reológica e o desempenho mecânico através de execuções dos ensaios de módulo complexo e de Fadiga. Foi observado nos resultados que a necessidade de se levar em consideração as ações da água e da temperatura no dimensionamento de pavimento de concreto asfálticos, bem como na previsão da vida útil das misturas asfálticas principalmente em regiões de clima tropical e subtropical.

No trabalho de Vargas & Aragão (2018) cujo principal objetivo foi contribuir com o entendimento sobre o comportamento global dos materiais e estruturas de pavimentos considerando a variação do nível do lençol freático, uma das principais variáveis associada às condições climáticas, foi utilizado um modelo físico em uma escala de verdadeira grandeza com perfis reais de campo. Constataram que o teor de umidade dos materiais granulares afeta significativamente a deflexão superficial e as deformações críticas da estrutura.

Melo (2017) ao determinar a influência das condições de ensaio na avaliação da sensibilidade à água de misturas betuminosas, com variação de cinco condições fundamentais da norma Europeia (temperatura da água, forma de aplicação, duração à temperatura do condicionamento e temperatura do ensaio de tração indireta) concluiu que a variação da temperatura da água é um dos principais fatores que mais influência nos resultados finais de sensibilidade à água, além de verificar que este ensaio é muito sensível em termos de variação de resultados.

Lopes (2019b), em parceria com a Petrobrás no projeto Rede Temática de Tecnologia em Asfalto, avaliando o desempenho funcional e estrutural de três segmentos monitorados, periodicamente desde a abertura ao tráfego em março de 2014, construídos em Santa Catarina, na rodovia BR-101/SC, em Araranguá. Verificou que o segmento monitorado composto por mistura asfáltica modificada por borracha teve menor afundamento de trilha de roda, irregularidade longitudinal, porcentagem de área trincada e deflexão máxima do que os segmentos com apenas mistura convencional. Com a inclusão da temperatura regional, a estimativa de vida útil foi cerca de 85% a 90% menor do que a prevista com temperatura constante de 20°C, havendo, assim, efeito da sazonalidade da temperatura no desempenho do pavimento.

3.2 Vulnerabilidade ambiental

A temática que aborda a vulnerabilidade ambiental tem sido bastante debatida nos últimos anos. É importante entender que esta faz uso de diferentes tipos de indicadores e recortes espaciais para sua caracterização. Na compreensão desse tema, o conceito de paisagem se torna bastante significativo. Rodriguez et al. (2004) afirma que o conceito de paisagem, como objeto de investigação científica, compõe-se de estrutura e heterogeneidade na composição de elementos que a integram, bem como suas relações múltiplas, variação dos estados e diversidade hierárquica, tipológica e individual. Como uma interligação sociedade/natureza, é definida pelo conjunto inter-relacionado de formações naturais e antroponaturais, capaz de: conter e reproduz recursos; ser um meio de vida e da atividade humana, além de tornar-se um laboratório natural e fonte de percepções estéticas. Desta maneira, a paisagem caracteriza-se pelas seguintes propriedades:

I) A comunidade territorial: através da homogeneidade na composição dos elementos que a integram, e o caráter de suas interações e inter-relações;

II) O caráter sistêmico e complexo de sua formação que determina a integridade e sua unidade;

III) O nível particular do intercâmbio de fluxos de substâncias, energia e informação, que determina seu metabolismo e funcionamento;

IV) A homogeneidade relativa da associação espacial das paisagens, que territorialmente caracterizam-se por um nível inferior, com regularidades de subordinação espacial e funcional.

A interferência do homem como modificador da paisagem natural sempre foi motivada pela busca do conforto, progresso ou até mesmo o simples interesse econômico. A fragilidade dos ambientes naturais, face as intervenções humanas, é maior ou menor em função de suas características genéticas. A princípio, salvo algumas regiões do planeta, os ambientes naturais mostram-se ou mostravam-se em estado de equilíbrio dinâmico até o momento em que as sociedades humanas passaram progressivamente a intervir cada vez mais intensamente na exploração dos recursos naturais (Ross, 1994). O autor afirma que a crescente industrialização concentrada em cidades, a mecanização da agricultura em sistema de monocultura, a generalizada implantação de pastagens, a intensa exploração de recursos energéticos e matérias-primas como carvão mineral, petróleo, recursos hídricos, minérios, tem alterado de modo irreversível o cenário da terra e levado com frequência a processos degenerativos profundos da natureza.

Santos (2007) afirma que neste século reconhecemos o papel decisivo do homem em suas ações e atividades, que por sua vez induziram efeitos e atuaram sobre a vulnerabilidade do meio. A exemplo do Brasil, nos últimos 500 anos, em pouco tempo de existência, fora transformada e extintas paisagens inteiras, exterminando grupos endêmicos gerados e especializados ao longo dos milhões de anos. Na Figura 4 nota-se as Florestas de Araucária, Mata Atlântica e Cerrado como exemplos de domínios que resistiram as mudanças geoclimáticas, porém vem sendo modificadas pelas ações antrópicas.



Figura 4. Homem como modificador da paisagem natural. Fonte: Santos (2007).

Saito (2011), citando o dicionário Houaiss (2001), afirma que o conceito de vulnerabilidade, que da mesma maneira é utilizado amplamente em diversos campos do conhecimento, é a qualidade ou estado do que é ou se encontra vulnerável, isto é, “*o que/quem pode ser fisicamente ferido ou sujeito a ser atacado, derrotado, prejudicado ou ofendido*”. A etimologia de vulnerável vem do latim *vulnerabilis* que significa “*que causa lesão*” e remete ao antepositivo *vulner*, o qual indica “*ferida*” e é semanticamente conexo com o grego *traûma*, atos. Saito (2011) afirma, ainda, que o termo vulnerabilidade denota um grau de suscetibilidade ou fragilidade que um determinado ambiente possui a um determinado tipo de impacto. Para o autor a palavra vulnerabilidade tem sentido negativo e está relacionada sempre com perdas.

De acordo com Figueirêdo et al. (2010) o significado de vulnerabilidade não é consenso em estudos sobre o tema, e dessa forma dificulta a comparação dos resultados de trabalhos semelhantes. O autor aborda diferentes conceitos de vulnerabilidade embasados em diversos escritores, alguns exemplos são citados a seguir. A vulnerabilidade está relacionada ao grau de susceptibilidade de um sistema aos efeitos negativos provenientes de mudanças globais, nesse contexto, a susceptibilidade está relacionada ao grau de exposição de ecossistemas a mudanças ambientais, à sensibilidade (avaliada a partir de medidas dos impactos ambientais potenciais resultantes da exposição) e à capacidade de resposta da sociedade em adotar ações de ajuste às mudanças. A vulnerabilidade está associada às características do meio físico e biótico (declividade, altitude, temperatura, aridez, vegetação, solo), à exposição a fontes de pressão ambiental (densidade populacional, uso da terra) e à ocorrência de impactos ambientais (erosão hídrica) em uma área montanhosa. A vulnerabilidade está correlacionada à exposição de uma bacia a pressões (densidade populacional, densidade de rodovias, uso e ocupação do solo) e a impactos ambientais potenciais (poluição por ozônio). A vulnerabilidade, também, está correlacionada a processos intrínsecos que ocorrem em um sistema, decorrente do seu grau de conservação (característica biótica do meio) e resiliência ou capacidade de recuperação após um dano, e a processos extrínsecos, relacionados à exposição a pressões ambientais atuais e futuras (apud Metzger et al., 2006; Schoter et al., 2004; Li et al., 2006; Tran et al., 2002; Villa e McLeod, 2002).

Dessa forma pode-se observar que o conceito de vulnerabilidade se refere a determinadas questões, problemas ou impactos ambientais (mudança climática, erosão etc.), assim é importante definir quais perturbações serão objeto do estudo, uma vez que um sistema pode ser vulnerável a um tipo de problema, enquanto a outros não. Também, observa-se que esse conceito está atrelado a outros, como exposição a pressões, impacto

ambiental, sensibilidade do sistema ecológico, capacidade adaptativa da sociedade, resiliência e susceptibilidade à ocorrência de efeitos negativos (Figueirêdo et al., 2010).

Segundo Tagliani (2003) a *vulnerabilidade ambiental* significa a maior ou menor susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer, e pode ser avaliada segundo três critérios:

I) *Fragilidade estrutural intrínseca* – condicionada por características inerentes ao substrato físico e que descrevem seus materiais, formas e processos, sintetizando suas relações;

II) *Sensibilidade* – condicionada pela proximidade de ecossistemas sensíveis, os quais sustentam e mantêm inúmeras funções ambientais;

III) *Grau de maturidade dos ecossistemas* – condicionada pelo tempo de evolução, uma das características que determinam a fragilidade relativa dos ecossistemas frente a perturbações antrópicas.

De acordo com Fushimi (2016) a Geomorfologia contribui significativamente nas pesquisas geográficas, dentre elas, no âmbito ambiental, o estudo da vulnerabilidade às manifestações erosivas lineares. A ideia de vulnerabilidade incorpora a fragilidade, ao integrar os aspectos da natureza, no entanto, introduz as práticas sociais que transformam as paisagens sob o contexto econômico do modo de produção capitalista.

Para os autores Aquino et al. (2017), apesar de complexa, a questão ambiental tem sido inserida nos mais diversos setores, caminhando, assim, para um desenvolvimento ambiental. Subdividir o tema em diferentes aspectos como: gestão ambiental, riscos, políticas e práticas ambientais, sustentabilidade e preservação, é um meio adotado para alcançar esse desenvolvimento. Todas essas partes interagem entre si e a abordagem da vulnerabilidade, bem como a avaliação qualitativa e quantitativa da sustentabilidade, vulnerabilidade e riscos ambientais, são formas que auxiliam no entendimento da complexidade e se tornam ferramentas para a mudança ambiental.

De acordo com Turner et al. (2003) a ideia de vulnerabilidade ambiental se tornou um dos pontos centrais do diálogo e pesquisas sobre sustentabilidade, implicando no surgimento de questões importantes. Os autores compuseram uma proposta de vulnerabilidade ambiental, em que é discutida a necessidade de inclusão de componentes essenciais para uma estrutura que seja capaz de orientar processos de tomada de decisão, dentro de uma escala temporal e espacial, preconizando as variações dos atributos ambientais. Turner et al. (2003) definiram três fatores que compõem uma estrutura de análise de vulnerabilidade ambiental:

I) *Exposição*: características que definem as ações humanas às quais a vulnerabilidade ambiental responde, devido às perturbações e impactos gerados;

II) *Sensibilidade*: condições do sistema relacionadas com a capacidade de suporte do mesmo e que são afetadas pela exposição;

III) *Resiliência*: mecanismos de enfrentamento dos impactos, através de ações naturais e humanas, no sentido de restabelecimento do padrão anterior de equilíbrio dinâmico do sistema.

A resiliência tem destaque no conceito de vulnerabilidade, tendo em vista que a alteração desse componente do sistema afeta automaticamente o outro. A resiliência é uma propriedade emergente, medida pela magnitude de distúrbios que o sistema pode absorver sem mudar sua estabilidade, ligada ao comportamento de auto organização e a ideia de múltiplos estados de equilíbrio, em que instabilidades podem levar o sistema para um regime diferente de comportamento. A perda de resiliência ocorre devido à crença que sistemas ecológicos complexos são previsíveis e que as ciências tradicionais vão resolver as incertezas relacionadas à gestão dos recursos, principalmente nas situações de aplicações de ações de comando e controle, em que se assume que a incerteza da natureza pode ser substituída pelo controle (Gunderson, 2000).

Para Santos (2007), conseguir observar e medir as relações entre características de um meio, eventos induzidos e efeitos adversos é estar, na verdade, medindo a vulnerabilidade ambiental de uma área. O autor afirma que para entender vulnerabilidade devemos considerar duas outras questões: a *persistência*, que é a medida do quanto um sistema, quando perturbado, se afasta do seu equilíbrio ou estabilidade sem mudar essencialmente seu estado e a *resiliência*, ou seja, a capacidade de um sistema retornar a seu estado de equilíbrio, após sofrer um distúrbio.

A estrutura de vulnerabilidade abordada por Turner et al. (2003) é guiada pela necessidade de fornecer um modelo adequado para a análise resumido, mas que inclui o caráter sistêmico mais amplo do problema. Para os autores a estrutura não é explicativa, mas fornece as classes amplas de componentes e ligações que compreendem a vulnerabilidade de um sistema acoplado a perigos. O esquema da Figura 5 consiste em: 1) ligações às condições e processos humanos e biofísicos (ambientais) mais amplos que operam no sistema acoplado em questão; 2) perturbações e estressores / estresse que emergem dessas condições e processos; e 3) o sistema de preocupação humano-ambiente acoplado no qual reside a vulnerabilidade, incluindo exposição e respostas, ou seja, enfrentamento, impactos, ajustes e adaptações. Esses elementos são interativos e dependentes de escala, de modo que a análise é afetada pela maneira como o sistema é conceituado e limitado para estudo.

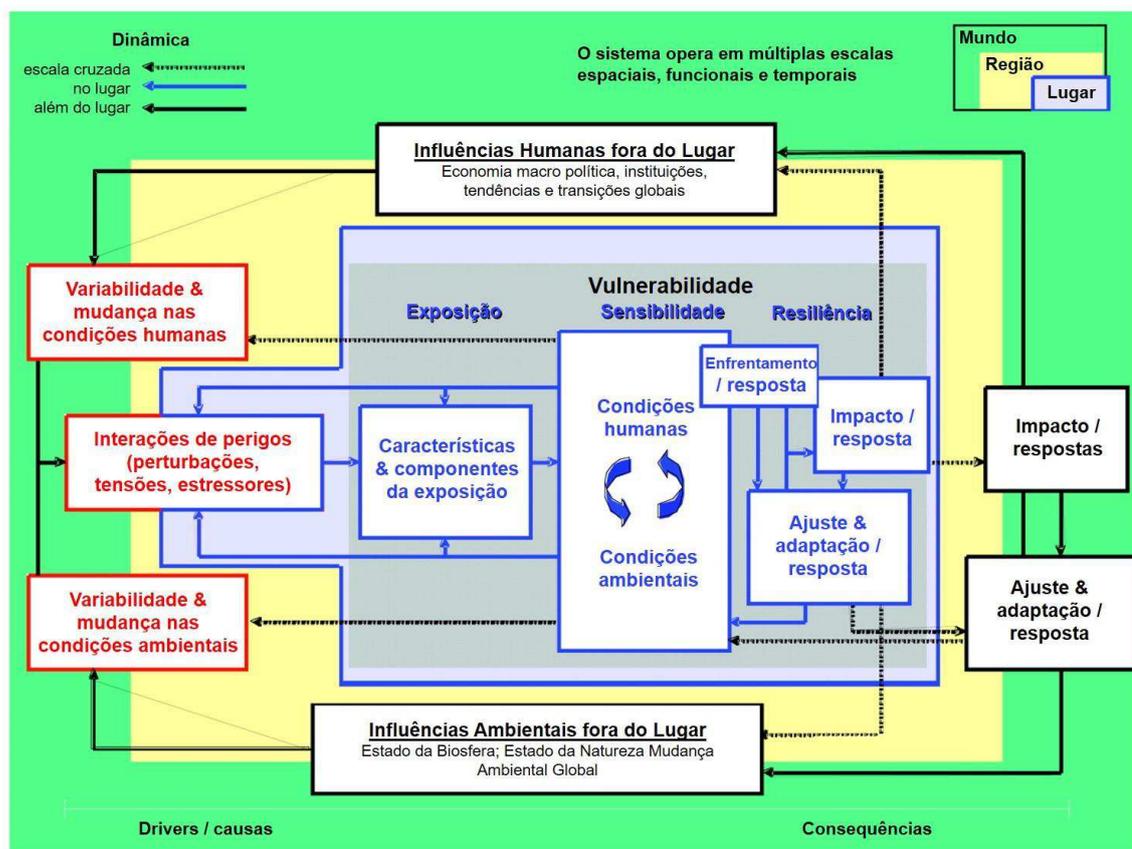


Figura 5. Estrutura de vulnerabilidade: Componentes de vulnerabilidade identificados e ligados a fatores além do sistema de estudo e operando em várias escalas. Fonte: Adaptado de Turner et al. (2003).

Segundo Wang et al. (2021) a vulnerabilidade rodoviária refere-se à natureza de uma estrutura rodoviária, ou seja, a dificuldade de manter seu estado de funcionamento devido a danos estruturais em ambientes agressivos. O clima severo é o principal responsável pela vulnerabilidade das rodovias, pois o pavimento é a parte do sistema rodoviário que interage diretamente com o meio externo. A avaliação da vulnerabilidade de pavimentos asfálticos deve ser focada no impacto das condições climáticas adversas. Os autores estabeleceram um modelo conceitual de avaliação de três estágios de vulnerabilidade do pavimento asfáltico composto de exposição-fragilidade-resiliência. A exposição se refere à possibilidade e ao grau de exposição do pavimento a ambientes agressivos, a fragilidade reflete o grau de dano ou destruição da estrutura do pavimento e a resiliência é a capacidade de se recuperar ao estado inicial após o dano causado pela ação humana (Figura 6).



Figura 6. Sistema de índice de avaliação de vulnerabilidade rodoviária em regiões frias. Fonte: Adaptado de Wang et al. (2021).

Dentro do modelo conceitual de Wang et al. (2021), que utilizou a metodologia de avaliação abrangente AHP-fuzzy para cálculo do peso dos índices utilizados, foram considerados, para os três estágios de vulnerabilidade do pavimento, os seguintes fatores:

I) *Exposição*: temperatura extremamente mais baixa ($^{\circ}\text{C}$), duração de baixa temperatura (d), diferença de temperatura diária ($^{\circ}\text{C}$), temperatura máxima extrema ($^{\circ}\text{C}$), duração de alta temperatura (d), radiação solar média anual (kW/m^2), projeto de rota (projeto de estrada horizontal e vertical – raio de giro), média anual de dias de chuva (d), capacidade de drenagem do pavimento, declive do terreno ($^{\circ}$), profundidade da incisão superficial (m), tipos geotécnicos, dias de congelamento e descongelamento (d), a frequência da nevasca, temperatura do permafrost ($^{\circ}\text{C}$) e conteúdo de gelo do permafrost;

II) *Fragilidade*: Índice de rachadura, graus de dano cumulativo e vida útil restante (%);

III) *Resiliência*: investimento financeiro regional, desenvolvimento econômico regional, manutenção do pavimento e condição de re-dano.

Barbosa (2020) teve como objetivo adaptar indicadores de vulnerabilidade ambiental e aplica-los na microrregião da Serra do Teixeira-PB avaliando sua eficiência na determinação da vulnerabilidade ambiental regional utilizando de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) como instrumento de coleta e validação de informações. Os resultados demonstram uma eficiência dos indicadores usados na análise da vulnerabilidade ambiental em regiões serranas visto o enfoque nas características geomorfológicas que são fatores relevantes na dinâmica ambiental desses locais. No trabalho, os indicadores que demonstraram maior influência sobre a vulnerabilidade ambiental final foram o uso e

ocupação do solo e a pedologia, com decadência significativa devido à forte influência antrópica e o manejo inadequado.

No trabalho de Nishizima (2021), que teve como objetivo principal compreender a morfodinâmica do relevo, relacionado às características que determinam e influenciam no índice da vulnerabilidade ambiental a processos erosivos lineares de parte do município de Mirante do Paranapanema – SP, observou-se que os diferentes níveis de vulnerabilidade ambiental a processos erosivos lineares, em condições climáticas (secas e/ou úmidas), estão diretamente relacionadas aos usos da terra, interconectados aos tipos de relevo, de solos, de cobertura vegetal e dinâmica de ocupação histórica pelos grupos/indivíduos sociais. Foi possível notar que na estação do verão, com a maior presença da classe “moderadamente estável”, principalmente em áreas com pequenos produtores rurais, já na estação do inverno, houve o aumento das classes de “médio, moderadamente vulnerável e vulnerável”, especialmente nas áreas onde ocorre o plantio de cana-de-açúcar.

Em seu estudo, Brandão (2020), analisou as vulnerabilidades ambientais da bacia hidrográfica do Rio das Flores (Região Oeste do Estado de Santa Catarina), de forma a estabelecer ações e limitações no uso e ocupação do solo, como a designação de medidas de segurança, inibição do desenvolvimento urbano e do corte de vegetação, estimular o plantio de vegetação nativa e desestimular o corte de vegetação em áreas vegetadas. O autor desenvolveu o roteiro metodológico aplicando a metodologia proposta por Crepani (2001), com a atribuição de pesos por meio do método AHP (Analytic Hierarchy Process) proposto por Saaty (1986). De acordo com os resultados, a área da bacia hidrográfica teve 0,1% vulnerável, 18,1% moderadamente vulnerável, 60% medianamente estável/vulnerável, 21,3% moderadamente estável e 0,6% estável. O autor criou o cenário hipotético onde a área seria totalmente urbanizada ou de solo exposto, nesse sentido as características mudariam pra 25,7% vulnerável, 71,6% moderadamente vulnerável, 2,7% medianamente estável e/ou vulnerável, com 0% de áreas em moderadamente estável e totalmente estável.

3.3 Geoprocessamento aplicado a vulnerabilidade ambiental

A coleta e obtenção de informações sobre a distribuição geográfica de recursos minerais, propriedades, animais e plantas sempre foram importantes partes das atividades em sociedades organizadas. Há poucas décadas atrás, no entanto, isto era feito apenas em documentos e mapas em papel, impedindo uma análise que combinasse diversos mapas e dados. Com o desenvolvimento da tecnologia de Informática na segunda metade deste século, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento. De acordo com

o autor o geoprocessamento é o processamento informatizado de dados georreferenciados que utiliza programas de computador permitindo o uso de informações cartográficas (mapas, cartas topográficas e plantas) para que se possa associar coordenadas desses mapas, cartas ou plantas. Sua utilização oferece recursos para diversas aplicações nas áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional (Teixeira, 2015).

De acordo com Câmara et al. (2001) o termo Geoprocessamento denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. As ferramentas computacionais para Geoprocessamento, chamadas de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados, além de tornar ainda possível automatizar a produção de mapas. Os autores afirmam que sempre que o “*onde*” aparece, dentre as questões e problemas que precisam ser resolvidos por um sistema informatizado, haverá uma oportunidade para considerar a adoção de um SIG. De forma genérica, pode-se dizer que “*Se onde é importante para seu negócio, então Geoprocessamento é sua ferramenta de trabalho*”.

As geotecnologias, representadas principalmente pelas imagens de satélite, softwares de geoprocessamento e dados de GPS, estão disponíveis a todos os usuários e progridem rapidamente. É possível a obtenção de imagens de satélite de várias resoluções espaciais, espectrais e temporais, e de softwares para geoprocessamento, que, em alguns casos, podem ser encontrados gratuitamente na internet. A popularização também do uso do GPS, utilizado principalmente nos trabalhos de campos em eventos de desastres, juntamente com as imagens e os softwares constitui-se no importante triângulo de ferramentas das geotecnologias, que auxiliam de forma decisiva na identificação, monitoramento e mapeamento de desastres naturais e eventos extremos, em todas as partes do mundo (Saito, 2011).

Os Sistemas de Informação Geográfica realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial. Devido a sua ampla gama de aplicações, há pelo menos três grandes maneiras de utilizar um SIG: como ferramenta para produção de mapas, como suporte para análise espacial de fenômenos e como um banco de dados geográficos. Pode-se indicar que um SIG tem os seguintes componentes: interface com usuário, entrada e integração de dados, funções de consulta e análise espacial, visualização e plotagem, armazenamento e recuperação de dados. Estes componentes se relacionam de forma hierárquica, ou seja, no nível mais próximo ao usuário, a interface

homem-máquina define como o sistema é operado e controlado, no nível intermediário, um SIG deve ter mecanismos de processamento de dados espaciais (entrada, edição, análise, visualização e saída) e no nível mais interno do sistema, um sistema de gerência de bancos de dados geográficos oferece armazenamento e recuperação dos dados espaciais e seus atributos (Câmara et al., 2001). Na Figura 7, nota-se o relacionamento dos principais componentes de um SIG.

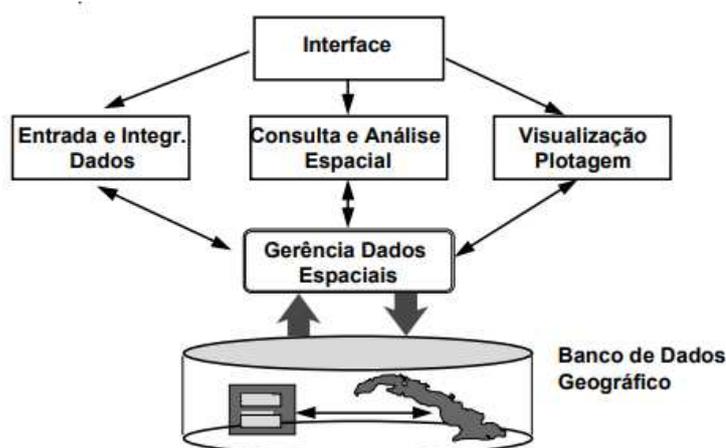


Figura 7. Estrutura Geral de Sistemas de Informação Geográfica. Fonte: Câmara et al. (2001).

O sensoriamento remoto é um termo utilizado na área das ciências aplicadas que se refere à obtenção de imagens à distância, adquiridas através de aparelhos denominados sensores remotos, sobre a superfície terrestre. Existe hoje um grande número de satélites em órbita, e estes obtêm imagens com características distintas que dependem tanto do satélite quanto do sensor. Uma imagem de sensoriamento remoto colorida é resultante da combinação das três cores básicas (azul, verde e vermelho), associadas através de filtros às imagens individuais obtidas em diferentes comprimentos de onda ou faixas espectrais. O nível de detalhe com que podemos observar os objetos da superfície terrestre se dá o nome de resolução espacial, que por sua vez é a capacidade que o sensor possui para discriminar objetos em função do seu tamanho. Imagens do que apresentam uma resolução espacial de 30 metros implica que objetos com dimensões menores do que 30 x 30 m não podem ser identificados. Através da combinação sincronizada da velocidade do satélite com a rotação da Terra é possível recobrir todo planeta após um certo número de dias. Além disso é importante notar que para se obter imagens da superfície terrestre não pode haver a presença de nuvens pois elas formam um anteparo entre o satélite e a superfície (Rudorff, 2006).

Dessa forma, Tôsto et al. (2014) diferencia os seguintes conceitos: *Geoprocessamento*, *Geotecnologias*, *Sistema de Informação Geográfica* e *Sensoriamento Remoto*. O *Geoprocessamento* consiste na coleta, tratamento, manipulação e análise de dados geográficos, assim, o conjunto dessas ferramentas, integrado em *Sistemas de Informação Geográfica*, permite analisar e cruzar dados oriundos de diversas fontes, facilitando a extração de informação e a tomada de decisão. As *Geotecnologias* são conjuntos de técnicas, composto por hardware (satélites, câmeras, GPS, computadores) e softwares, além de métodos científicos aplicados à análise, à exploração, ao estudo e à conservação dos recursos naturais, considerando diferentes escalas e a informação espacial. O SIG é um exemplo de geotecnologia e representa a união de hardware e de software capazes de armazenar, analisar e processar dados georreferenciados. Por fim, o *Sensoriamento Remoto* é a ciência e a arte de coletar dados ou informações de um objeto a partir da energia refletida por esse objeto, fazendo uso de satélites artificiais que são exemplos de sensores remotos.

De acordo com Pereira (2019) a exposição das metodologias, aplicadas a fragilidade ambiental, vulnerabilidade ambiental, uso e ocupação da terra, que utilizam as geotecnologias e as ferramentas do sensoriamento remoto, proporcionam a interpretação e avaliação dos elementos dispostos sobre a superfície terrestre em tempos pretéritos, permitindo, ainda, conjugá-los em escalas temporais. Para o autor, é constatado a qualidade dos mapas temáticos, bem como a eficácia dos resultados, além do fato dos mesmos poderem contar com plugins de softwares (SIG) que permitem a apuração e comparação da veracidade dos dados coletados e projetados nos produtos cartográficos. Dessa forma, as geotecnologias surgiram como um instrumento de grande importância para os estudos geográficos, especialmente nas análises espaciais.

Para Grigio (2003) o uso de Sensoriamento Remoto com base na análise de imagens de satélite é um dos meios que se dispõe hoje para acelerar e reduzir custos dos mapeamentos e da detecção de mudanças geoambientais. O geoprocessamento pode ser utilizado em análise ambiental para estabelecer comparações de uma mesma paisagem entre dois ou mais períodos de tempo, porém, as paisagens respondem a múltiplas perturbações e seus efeitos são, na maioria das vezes, complexos e difíceis de serem previstos. Para o autor em combinação com aerofotogrametria e geodésia, com os recentes recursos dos Sistemas de Informações Geográficas, aliados às novas técnicas de processamento e aos novos sensores, as imagens de satélite oferecem possibilidades de gerarem informações sinópticas e precisas para avaliação e evolução de diversas variações temáticas da superfície terrestre.

A aplicação das geotecnologias, principalmente por meio dos Sistemas de Informação Geográfica, tem demonstrado ser eficiente para análises das interações das ações humanas sobre o meio físico e biológico, permitindo obter informações complementares a respeito destas influências mútuas. Através das técnicas de geoprocessamento, tornou-se possível gerar produtos que possam contribuir para uma melhor planificação territorial, especialmente no estudo da vulnerabilidade. A superposição das camadas de informação da base cartográfica digital permite a visualização das informações espaciais e os relacionamentos, desse modo os elementos podem ser visualizados de forma integrada, apresentando suas vulnerabilidades. Portanto, pode-se melhorar a interpretação e compreensão das características ambientais, sociais e das relações que ocorrem em um determinado espaço (Zanella et al., 2013).

Para Crepani et al. (2001) a adoção das imagens de satélite como “âncora” para o Zoneamento Ecológico-Econômico traz consigo a possibilidade de se utilizar todo o potencial disponível no Sensoriamento Remoto e nos Sistemas de Informações Geográficas, além de desenvolver uma metodologia perfeitamente aplicável a novos produtos orbitais que estarão disponíveis no futuro. De acordo com Silva et al. (2019a), atualmente, com as plataformas computacionais em nuvem de Sensoriamento Remoto de mapeamento em escala global, a tendência é de maior ocorrência de mapeamentos multitemporais de grandes áreas. Para os autores esse tipo de mapeamento que vem sendo muito viável e eficiente, encontra um grande desafio, que a mensuração de sua qualidade nos processos de validação dos mapeamentos. A evolução dos Sistemas de Informações Geográficas facilitou a seleção e cruzamento de diferentes variáveis consideradas relevantes na análise ambiental, permitindo maior agilidade na integração de dados e na geração de resultados (Filho et al., 2018).

Na análise da vulnerabilidade de pavimentos asfálticos sob clima de temperatura extremamente alta, Wang et al. (2021) utilizaram a plataforma SIG usando a metodologia de análise de cenário. O pavimento avaliado está localizado em Huma, na província de Heilongjiang, China, onde há a probabilidade de temperaturas extremamente altas no verão. Sob temperatura e carga elevadas, uma grande deformação normalmente pode ser gerada no pavimento, e a probabilidade de falha por fadiga é acentuada.

No trabalho de Silva et al. (2019b) caracterizou-se a vulnerabilidade ambiental da Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo (RBNSC) no Pará, unidade de conservação de proteção integral utilizando ferramentas do geoprocessamento na identificação de áreas mais susceptíveis à degradação. Todas as variáveis foram caracterizadas a partir de técnicas de geoprocessamento, utilizando o software ArcMap 10.5,

para a manipulação dos dados geográficos e elaboração dos mapas temáticos. Para o autor, a associação das técnicas de geoprocessamento com a metodologia para obtenção das cinco classes de vulnerabilidade apresentou-se de forma satisfatória na identificação das áreas mais frágeis no interior da unidade de conservação, fornecendo subsídio para a replicação da metodologia em áreas que também possui características naturais relevantes na manutenção do ecossistema.

Pizani et al. (2017) ao fazer um diagnóstico das áreas ambientalmente vulneráveis no município de Rio Acima aplicando análise multicritério aos temas geologia, solo, uso e cobertura da terra, declividade e altimetria, fez uso de técnicas de geoprocessamento. Na elaboração do mapa de vulnerabilidade ambiental, que indica as áreas propensas a riscos oriundos da perda de solos, utilizou-se a metodologia multicritério realizada com Sistemas de Informação Geográfica que, segundo os autores, constituiu um instrumento valioso para apoiar as mais diferentes atividades de planejamento, incluindo análise de suscetibilidade ao risco.

Sabendo-se que o Parna do Catimbau constitui áreas de prioridade alta de conservação devido à susceptibilidade a desertificação, Garcia et al. (2020), teve como objetivo avaliar a vulnerabilidade das caatingas presentes nesta unidade de conservação. Na metodologia utilizada, que segundo os autores mostrou-se adequada, contou com a aplicação do índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS), sensoriamento remoto termal e visita em campo que permitiu a análise da espacialização das imagens orbitais, dos satélites Landsat 5 e 8 nos anos de 1995, 2006 e 2016.

No estudo de Dellargine et al. (2020), que realizou a análise e mapeamento da vulnerabilidade ambiental do Município de Inconfidentes/MG, foi utilizado na sua metodologia, além das atividades de campo, a interpolação geoestatística, processamento digital de imagens e análise geoespacial, por meio de álgebra de mapas, ferramentas essas, fornecidas pelo uso das geotecnologias. Para os autores a utilização de ferramentas do geoprocessamento foi eficiente, o qual permitiu realizar uma avaliação de como os sistemas ambientais estão se comportando frente às diversas pressões sofridas, sejam de ordem natural ou de natureza antrópica.

Para Dias & Figuerôa (2020) somente a criação de Unidades de Conservação (UC), não assegura a proteção aos recursos naturais e culturais previstos na legislação. De acordo com os autores a utilização de geotecnologias tem sido aplicada às questões ambientais, sendo observada sua utilização em várias partes do mundo. Dias & Figuerôa (2020) objetivando discutir potencialidades de alguns métodos e técnicas de geotecnologias que podem ser especificamente eficientes para a gestão e planejamento de UC, concluíram que a

utilização de ferramentas e técnicas de geotecnologias auxilia as diversas etapas do planejamento, criação, pesquisa e monitoramento de UC, influenciando na tomada de decisão pela gestão. Na legislação brasileira, os planos de manejo devem ser revistos a cada 10 anos, portanto o monitoramento contínuo utilizando as ferramentas de geotecnologias fornece otimização nesse processo.

3.3.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Os modelos digitais de elevação são arquivos representativos da topografia que contêm registros altimétricos (altitude do relevo) estruturados em linhas e colunas georreferenciadas, como uma imagem com um valor de elevação em cada pixel. As curvas de nível constituem uma importante fonte de dados para a construção do MDE, as altitudes são estimadas ponto a ponto através da digitalização das isolinhas e sua subsequente interpolação (Valeriano, 2008). A partir do modelo numérico do terreno é possível representar espacialmente a grandeza de qualquer tipo de evento, seja este hidrometeorológico, geofísico, geoquímico e altimétrico, sendo este último o MDE. Com estes modelos é possível: calcular volume e área, traçar perfil e secção transversal, gerar isolinhas e mapas de declividade, orientação de vertentes, sombreamento e visibilidade, além de visualizar em perspectiva tridimensional (Câmara et al., 2001).

De acordo Elmiro (2008) os recursos oferecidos pelo MDE podem ser aplicados nas diversas áreas da Engenharia. O avanço tecnológico acarretou o aumento da demanda por informações derivadas de análises espaciais e a crescente disponibilidade de dados para este fim, algumas aplicações bem estabelecidas podem ser citadas:

- 1) Solução de problemas e cálculo de volumes de corte e aterro nos projetos de rodovias, ferrovias e grandes obras da Engenharia Civil;
- 2) Planejamento de reservatórios, estudo de redes de drenagem, delineamento de bacias hidrográficas, estimativas de erosão e escoamento;
- 3) Planejamento de vias de comunicações, transporte de energia e localização de represas;
- 4) Preparação de mapas de declividade, mapas de orientação de encostas e de insolação, mapas de relevo sombreado, mapas de convexidade e de concavidade;
- 5) Armazenamento da altimetria para mapas digitais em SIGs;
- 6) Geração automática de isolinhas e curvas de níveis;
- 7) Geração de perspectivas tridimensionais, blocos-diagrama e perfis topográficos;
- 8) Ortorectificação de fotografias aéreas e imagens de sensoriamento remoto; e

9) Representação tridimensional de paisagens para orientação de mísseis militares, vôos de aeronaves, treinamento de pilotos, análise de intervisibilidade e comunicação.

Na Engenharia Civil, Schäfer (2004) aponta o uso do MDE em mapeamentos topográficos de larga escala, determinação de volumes de corte e aterro em trabalhos de movimentação de terra para projetos rodoviários, criação de modelos de projeto digital de estruturas como barragens e visualização do impacto de projetos de engenharia no ambiente em que serão inseridos. Para o autor o MDE foi inicialmente utilizado para a determinação de volumes de corte e aterro, porém atualmente é usufruído no projeto da rodovia propriamente dito, como na criação de modelos de projeto digital da rodovia proposta, possibilitando a visualização real do impacto que a implantação do projeto rodoviário causará no ambiente.

No trabalho de Schäfer (2004) foi feito o estudo, em um trecho da rodovia SC-414, de aplicações do sensor Laser Scanner e produtos fotogramétricos, além da integração de ambos em projetos rodoviários. Foi gerando os mapas de uso do solo, MDTs, MDEs e cartas de declividade, ao fazer o tratamento da nuvem de pontos laser utilizando e integração com os produtos fotogramétricos. A sobreposição dos produtos gerados tornou possível a realização da análise temática da faixa de domínio, além da análise de propriedades rurais na área diretamente afetada pela implantação da rodovia. O trabalho concluiu que a utilização conjunta dos produtos gerados com o cadastro técnico e o projeto geométrico da rodovia estabelece uma forte ferramenta para análises temáticas da área onde a rodovia será implantada.

A construção de bacias de retenção é uma forma de destinar a água escoada do leito de estradas, reduzindo o volume e a velocidade de escoamento. As estradas não-pavimentadas, são essenciais, entre outras coisas, para o acesso às áreas de produção agrícola, porém são responsáveis por aproximadamente 50% das perdas de solo por erosão, assoreando mananciais. No trabalho de Cunha et al. (2011), a partir do modelo digital de elevação (MDE) da Bacia Hidrográfica de Palmital (Viçosa/MG), foi elaborado o mapa de classes de altimetria e gerado o mapa de declividade para a área, o objetivo foi aplicar características espaciais as diferentes classes de declive. De acordo com os resultados foi possível perceber que as declividades menores proporcionam maiores volumes e espaçamento para locação de bacias de acumulação.

3.3.2 Dados meteorológicos

Entre os tipos de agentes erosivos, a ação das chuvas, principalmente em regiões tropicais ou subtropicais úmidas, proporciona maior impacto, sendo a sua intensidade um fator muito importante. Nessa perspectiva, o processo erosivo apresenta três etapas: (I) *Desagregação* - provocada pelo impacto das gotas da chuva sobre o solo nu, havendo o rompimento dos agregados da superfície; (II) *Transporte* - escoamento superficial da água que transporta as partículas desprendidas; e (III) *Deposição* - provocada pela sedimentação das partículas dos ambientes erodidos. Uma importante ferramenta na seleção de práticas de conservação do solo é a estimativa das perdas de solo por erosão hídrica, através de equações empíricas, para a identificação das áreas de risco de erosão. Entre os reflexos decorrentes do uso de SIG, além das questões de velocidade e praticidade na integração dos dados, têm-se a flexibilização de escalas, critérios e condições de operação, também, pode-se citar o desenvolvimento de métodos baseados no cálculo da degradação de solos e água através do geoprocessamento de dados do meio físico como: chuva, temperatura máxima ou mínima do ar, vento, umidade relativa do ar e radiação solar (Valeriano & Picini, 2003).

O trabalho de Filho et al. (2018) teve como objetivo aplicar uma metodologia para estimar áreas propensas a vulnerabilidade ambiental na região serrana do estado do Rio de Janeiro, utilizando análise multicritério e modelagem em SIG, através da álgebra de mapas. Além de usar dados básicos de solo, litologia, relevo, declive, uso da terra, vegetação, os autores utilizaram dados pluviométricos e como forma de diferenciar o efeito da sazonalidade e intensidade da precipitação, baseou-se nas séries históricas de 1966 a 2007, das estações pluviométricas existentes na área. As áreas mais vulneráveis foram aquelas associadas a um conjunto de fatores que incluem, entre outros, a precipitação mais elevada.

Além dos dados climáticos de precipitação é possível avaliar dados de temperatura da superfície dos materiais de pavimentação utilizando as geotecnologias. Neto (2015), por sua vez, utilizou de duas imagens do sensor TM, a bordo do satélite Landsat 5, para avaliar de forma especializada a temperatura da superfície de alguns materiais utilizados na pavimentação urbana de Recife/PE, com o intuito de determinar o favorecimento desses materiais nas mudanças das variáveis climáticas como o aumento de temperatura e redução da umidade relativa do ar. A partir dos resultados observaram que os materiais de pavimentação que possuem cores escuras, como os asfaltos, têm as maiores temperaturas de superfície. Por possuírem baixos valores de albedo, absorvem grandes quantidades de radiação solar, armazenados em seu interior na forma de calor.

Viola & Celauro (2015), ao verificar a influência das mudanças climáticas na seleção adequada do ligante asfáltico para a construção do pavimento, fizeram uso das temperaturas

diárias registradas na Itália, fornecidas pelo Serviço Meteorológico da Força Aérea Italiana, com intervalo temporal de 30 anos, entre o período 1984-2013. Os autores estudaram um total de 71 estações meteorológicas, de forma a garantir uma boa representação de todo o território nacional, localizadas em uma área de cerca de 300.000km². Com o objetivo de detectar uma tendência foi utilizado o teste não paramétrico de Mann-Kendall, que por sua vez não faz suposição sobre as propriedades de distribuição e não é influenciado pela presença de outliers. A partir disso foi possível construir mapas temáticos que permitiram incluir os efeitos das mudanças climáticas no projeto do tipo de ligante asfáltico.

3.3.3 Dados espaciais de natureza contínua em SIG

Para Botelho (1995) os dados geográficos apresentam três componentes principais: (I) *Atributo* - descreve as propriedades temáticas de uma entidade geográfica; (II) *Localização* - contém a descrição das características espaciais de uma entidade geográfica; e (III) *Tempo* - descreve os períodos em que os valores daqueles dados geográficos são válidos. As duas formas de representação dos dados em um SIG são as formas *vetorial*, que utiliza pontos, linhas e polígonos para descrever dados espaciais, e a forma *matricial* originária de imagens (*raster*), sendo caracterizada por uma matriz de células (*pixel*) de tamanhos regulares, onde para cada célula é associado um conjunto de valores representando as características geográficas da região. Para facilitar a análise geográfica, um mapa é dividido em camadas temáticas, variáveis de acordo com a conveniência do usuário, onde cada camada consiste num conjunto de características geográficas logicamente relacionadas.

Conforme Ferreira (2006), de acordo com as características geométricas relacionadas ao mapeamento, existe a categoria de elementos de natureza *contínua*. Estes caracterizam pela dificuldade na localização dos limites entre classes. Pode-se citar, dentre vários elementos: os solos, o relevo, a vegetação, a geologia, a geomorfologia, a temperatura, a paisagem e a pluviometria. Os limites que distinguem as classes de cada tema, são obtidas através de uma coleta de amostras seguida da realização de interpolações com o objetivo de restaurar a continuidade e/ou a classificação do tema. Os elementos temáticos podem ser representados, em SIG, tanto por estrutura vetorial (conjuntos de pontos, isolinhas ou redes de polígonos), ou por elementos de estrutura matricial (conjuntos de pixels de imagens digitais).

Dentro dessa perspectiva, Crepani et al. (2001) estabelece a vulnerabilidade das unidades de paisagem através de uma escala de valores relativos e empíricos aplicada conforme a relação morfogênese e pedogênese. O autor analisa individualmente cada um dos temas: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso do solo e clima. Na metodologia,

para o tratamento digital das imagens, edição de planos de informação, montagem e manipulação do banco de dados, foi feito o uso de do software SPRING, que é um Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas desenvolvido pelo INPE.

No trabalho de Nörnberg & Rehbein (2021) foram aplicados e comparados modelos de fragilidade e vulnerabilidade ambiental, Ross (1994) e Crepani et al. (2001), relacionados à perda de solos para área do município de Pelotas/RS. Os autores sobrepuseram, utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, os temas de geologia, geomorfologia, hipsometria, declividade, pedologia e cobertura e uso do solo. O trabalho concluiu, entre outros aspectos, que o modelo de Ross (1994) resultou em um maior número de classes para área do município, evidenciando maior detalhamento hierárquico espacial. A espacialização das classes do modelo de Ross (1994), segundo os autores, é mais coerente com as análises sobre a morfodinâmica das unidades do relevo do município de Pelotas, quando comparadas a outros trabalhos.

3.3.4 Álgebras de mapas

Segundo Barbosa (1999), na bibliografia do Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, o termo “Álgebra de Mapas”, cunhado por Tomlin (1990), denota o conjunto de operadores matemáticos, em analogia aos ambientes de álgebra e estatística, que manipulam campos geográficos sejam estes compostos por imagens, mapas temáticos ou modelos numéricos do terreno. Tomlin (1990) afirma que a Álgebra de Mapas é o conjunto de procedimentos de análise espacial que utiliza de funções de manipulação aplicadas a um ou mais mapas sobrepostos para produção de novos dados. A matemática é aplicada de forma igualitária a todos os pontos do mapa que é considerado como uma variável isolada. As operações podem ser divididas em três classes: (I) *Pontuais* - geram mapas onde os valores são resultados dos valores dos mapas de entrada para cada localização correspondente; (II) *Vizinhança* – geram mapas onde os valores dependem da vizinhança da localização estudada; e (III) *Zonais* – a partir restrições fornecidas por um mapa, define-se zonas sobre regiões específicas de um mapa de entrada.

No trabalho de Costa et al. (2019), foi utilizado análise multicriterial de dados georreferenciados e o conceito de álgebra de mapas para o cruzamento de dados, com o intuito de criar um arquivo no formato *shapefile* servindo de meio para planejamento do DNIT e como base de dados para a geração de mapas temáticos referentes à malha rodoviária federal e a sua hierarquização estratégica. Utilizando de dados que relacionam o aumento de fluxo, danificação do pavimento e importância socioeconômica, foi realizado o pré-processamento para que as informações fossem convertidas para o formato matricial da

álgebra de mapas, além disso estipulou-se 3 cenários, no quais foram aplicados diferentes pesos para uma das classes utilizadas como critérios na álgebra de mapas. A ferramenta utilizada foi a Raster Calculator do ArcGIS™ Pro (v.2.3.3), adotando como forma de cálculo a média geométrica dos pixels, para o cruzamento dos dados e posterior identificação das regiões que mais influenciaram o fluxo rodoviário.

No trabalho de Mendes et al. (2020), a partir de aplicação de álgebra de mapas, utilizando do cruzamento de bandas e auxílio da calculadora *raster*, foi possível combinar diferentes mapas temáticos limitantes e não limitantes (pontes, áreas úmidas, matas ciliares, solos, declividade, e uso e ocupação do solo) para gerar um mapa final das áreas de risco à inundação de uma bacia hidrográfica afim de servir de apoio aos gestores públicos na regulamentação e fiscalização dessas áreas. O trabalho identificou que as áreas de baixo risco a inundação são compostas por vegetação e maiores declividades, já as áreas que apresentam maiores riscos a inundações estão situadas próximas ao exutório da bacia, sendo predominantemente áreas de baixa declividade. Sokoloski et al. (2019) elaboraram um mapa de vulnerabilidade natural, utilizando de SIG e análise multicritério por meio de álgebra de mapas, para a sub-bacia do rio Piracicaba/MG, afluente da margem esquerda do rio Doce, que por sua vez apresenta alto grau de antropização e concentra atividades minerárias. Os autores consideraram os temas de geologia, pedologia, declividade e cobertura vegetal, e empregaram pesos de 1 a 5, considerando o grau de vulnerabilidade à erosão.

3.3.5 Análise estatística multivariada de dados

A Análise Multivariada corresponde aos métodos que estudam, ao mesmo tempo e de forma conjunta, as inúmeras variáveis representativas de um fenômeno. Para Neto (2010) a Análise Multivariada consiste no estudo estatístico dos problemas relacionados com: inferências sobre médias multivariadas; análise da estrutura de covariância de uma matriz de dados e técnicas de reconhecimento de padrão, classificação e agrupamento. Segundo Vicini (2005) apenas nos dias de hoje consegue-se desenvolver e aplicar a técnica da estatística multivariada, pois embora tenha surgido por volta de 1901, sem o auxílio de programas computacionais não seria possível realizar de forma rápida e clara, os gráficos que possibilitam estudar o inter-relacionamento das variáveis.

Entre as várias técnicas de estatística multivariada, a Análise Fatorial é um procedimento que permite a redução da quantidade de variáveis para fatores que explicam um percentual representativo da variabilidade total das variáveis em estudo de acordo com a estrutura de dependência existente entre as variáveis de interesse, seja ela a matriz de correlações ou a covariâncias entre as variáveis (Almeida, 2010).

Dong et al. (2021) utilizaram três aprendizados de máquina não supervisionados, incluindo Análise de Componentes Principais (ACP), Análise de fatorial e Análise de Cluster, para identificar o componente principal e os fatores comuns em 16 variáveis de dados climáticos, envolvendo temperatura anual, congelamento, degelo, precipitação e condições de queda de neve, para avaliar a regionalização climática para infraestrutura de pavimentação. Os resultados da ACP e da Análise Fatorial mostraram que a temperatura e a umidade são os dois primeiros componentes principais e fatores comuns, respondendo por 71,6% da variância.

No trabalho de Nunes & Aquino (2018), foi utilizado o tratamento estatístico por meio da Análise Multivariada (caracterizada pela análise de um conjunto de variáveis relacionadas ao mesmo objeto) e Análise Fatorial (onde há a redução dos valores das variáveis sem prejuízo para o tratamento estatístico) dos dados relacionados a 72 setores censitários e a 12 variáveis ambientais, para análise da vulnerabilidade ambiental às margens do rio Poti no município de Teresina/PI. As variáveis que apresentaram maior grau de vulnerabilidade ambiental, relacionadas ao processo de degradação ambiental e ao desencadeamento de riscos, foram: cobertura vegetal, proximidade com corpos hídricos, adensamento populacional/residencial, esgoto a céu aberto e lixo a céu aberto.

Azevedo et al. (2019), tomando como base a aplicação de estatística multivariada a partir da técnica de Análise Fatorial (AF), analisaram a vulnerabilidade socioeconômica e ambiental nos municípios do Estado da Paraíba, a partir de variáveis com dimensões Socioeconômica, Demográfica, Assistência à saúde e ambiental. A AF foi utilizada para identificar as relações existentes entre o conjunto de variáveis dependentes e uma variável latente ou fator, descobrindo as dimensões isoladas da estrutura dos dados para então determinar o grau em que cada variável é explicada por cada fator. A partir da AF foi possível compreender as relações existentes entre os fatores ajustados, identificando os cinco principais que atuam sobre a vulnerabilidade (temperatura média do ar, máxima temperatura média, precipitação anual, IDHM da renda e renda per capita), determinando, assim, o Índice de Vulnerabilidade Socioeconômica e Ambiental (IVSA). Esse índice foi definido como uma combinação linear dos escores fatoriais e a proporção da variância explicada por cada fator em relação à variância dos fatores comuns que descrevem as principais características ambientais e socioeconômicas da área de estudo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

A área de estudo (Figura 8) compreende as microrregiões do estado da Paraíba que estão inseridas no entorno do trecho entre as cidades de Campina Grande/PB e João Pessoa/PB da rodovia federal transversal BR-230, também conhecida como Rodovia Transamazônica. Na microrregião de Campina Grande tem-se as cidades de Boa Vista, Campina Grande, Fagundes, Lagoa Seca, Massaranduba, Puxinanã, Queimadas e Serra Redonda. Na microrregião de Itabaiana tem-se as cidades de Caldas Brandão, Gurinhém, Ingá, Itabaiana, Itatuba, Juarez Távora, Mogeiro, Riachão do Bacamarte e Salgado de São Félix. Na microrregião de Sapé tem-se as cidades de Cruz do Espírito Santo, Juripiranga, Mari, Pilar, Riachão do Poço, São José dos Ramos, São Miguel de Taipu, Sapé e Sobrado. E por fim, da microrregião de João Pessoa tem-se as cidades de Bayeux, Cabedelo, Conde, João Pessoa, Lucena e Santa Rita. A área total estudada é de 6.137,43km² e o trecho da BR-230 analisado tem uma extensão de 112km.

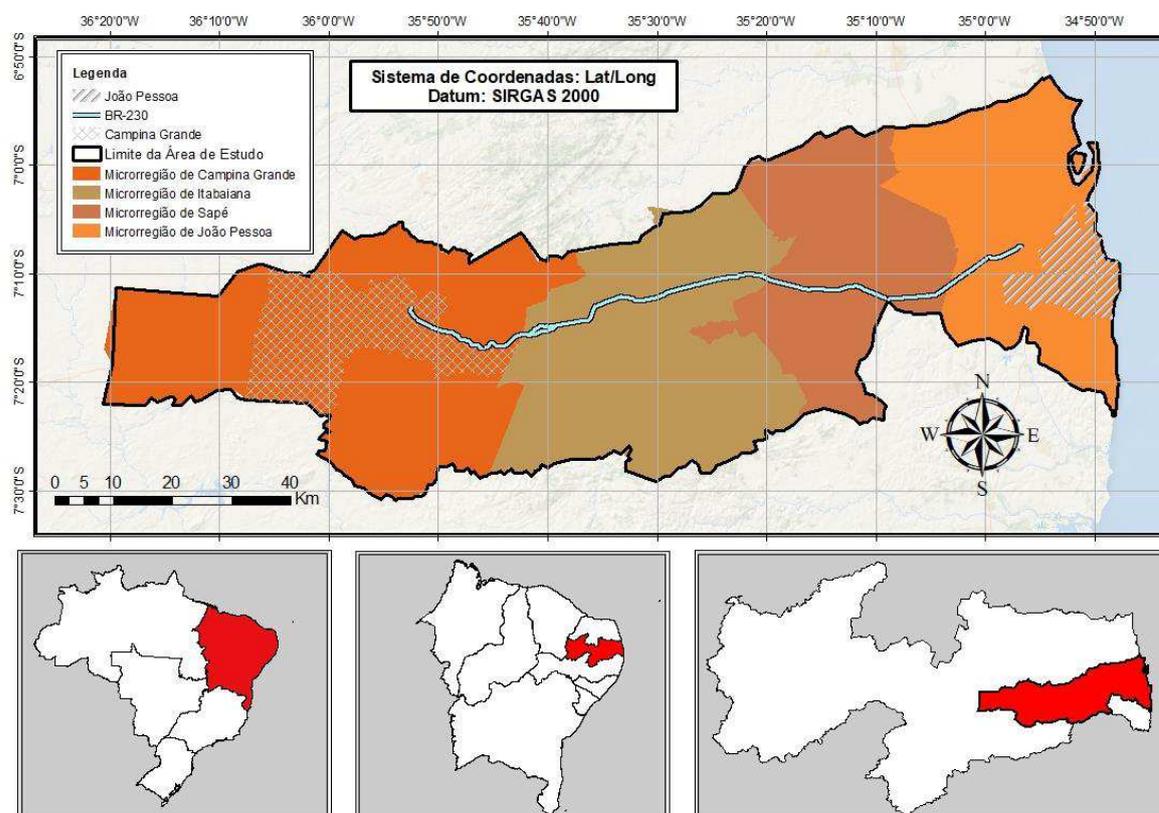


Figura 8. Localização da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

4.1.1 *Clima*

O trecho da área de estudo foi escolhido devido a mudanças de condições, principalmente climáticas, que acontecem ao longo da rodovia, sendo possível identificar diferentes fenômenos de degradação do pavimento que possam ocorrer. As microrregiões de Campina Grande e Itabaiana fazem parte da mesorregião do Agreste Paraibano, porção oriental do Estado. De acordo com a classificação Köppen, grande parte destas áreas apresentam-se como As', clima tropical quente e úmido, com ocorrência das maiores precipitações outono-inverno nos meses de abril a julho (Peel et al., 2007). De acordo com Pereira et al. (2001), por estar inserida na região semiárida, engloba áreas que pela umidade assemelham-se às do litoral e outras secas como as associadas ao Sertão. As temperaturas médias variam entre mínimas de 17 a 20 °C e máximas de 22 a 26 °C. A umidade relativa do ar situa-se em torno de 79%. As precipitações pluviométricas médias anuais das áreas variam entre 700 e 1600mm (Silva et al., 2015).

As microrregiões de Sapé e João Pessoa fazem parte da mesorregião da Mata Paraibana. Segundo a classificação climática de Köppen, seu tipo climático é As', quente e úmido com chuvas de outono/inverno que ocorrem desde o Litoral até a grande porção do Agreste. As precipitações médias anuais situam-se na faixa de 1600 a 2.200mm/ano, cujo período chuvoso inicia-se de fevereiro a março e prolonga-se até agosto. O período de estiagem é de 5 a 6 meses, a temperatura média anual está entre 22° C e 30° C e a umidade relativa do ar média é de 70% (Resumo executivo – 2010-2020).

De acordo com o IBGE (2002) a área de estudo tem clima quente (média > 18° C em todos os meses do ano), semiárido com 6 a 8 meses secos, semiúmido com 4 a 5 meses secos e úmido com 1 a 3 meses secos (Figura 9).

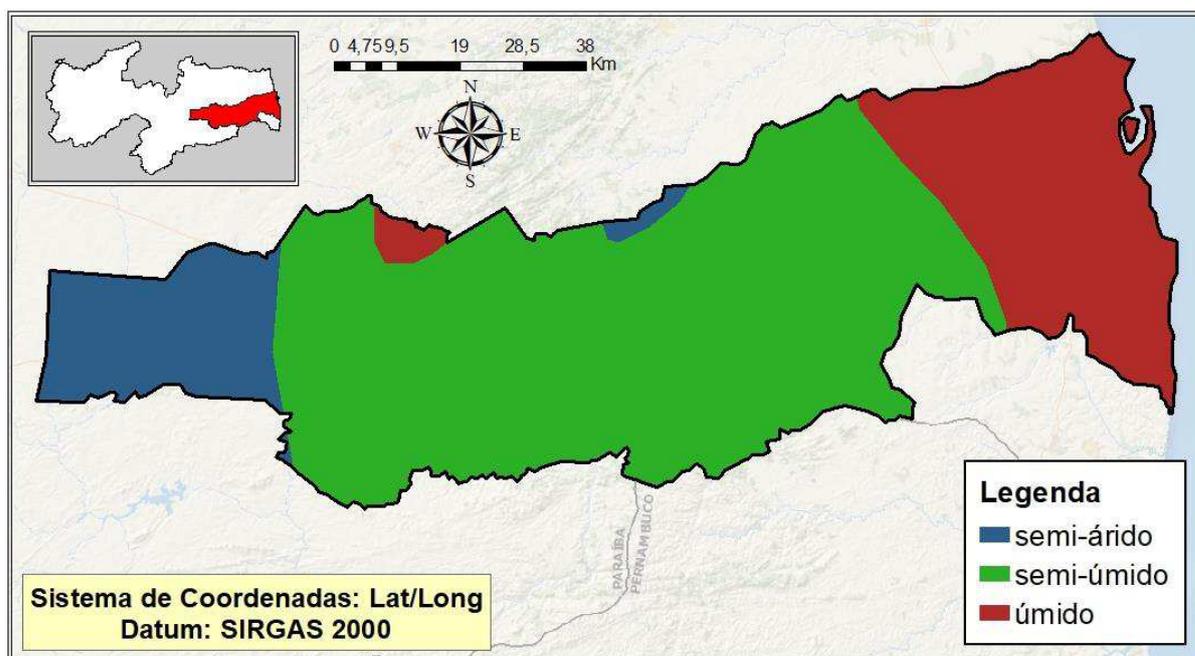


Figura 9. Mapa de climas da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

Quanto a divisão em zonas (Figura 10), a área de estudo possui Clima Tropical Nordeste Oriental que está sob forte influência da umidade do Oceano Atlântico e é caracterizado por elevadas temperaturas ao longo de todo o ano, inverno chuvoso e verão menos úmido; a temperatura média anual é de 25°C. Também, tem Clima Tropical Zona Equatorial, que se caracteriza pelas estações do ano de inverno e verão marcadas pela presença e ausência de chuva, verão chuvoso e inverno seco com pouca chuva, já as temperaturas são elevadas com baixa amplitude térmica (IBGE, 2002).

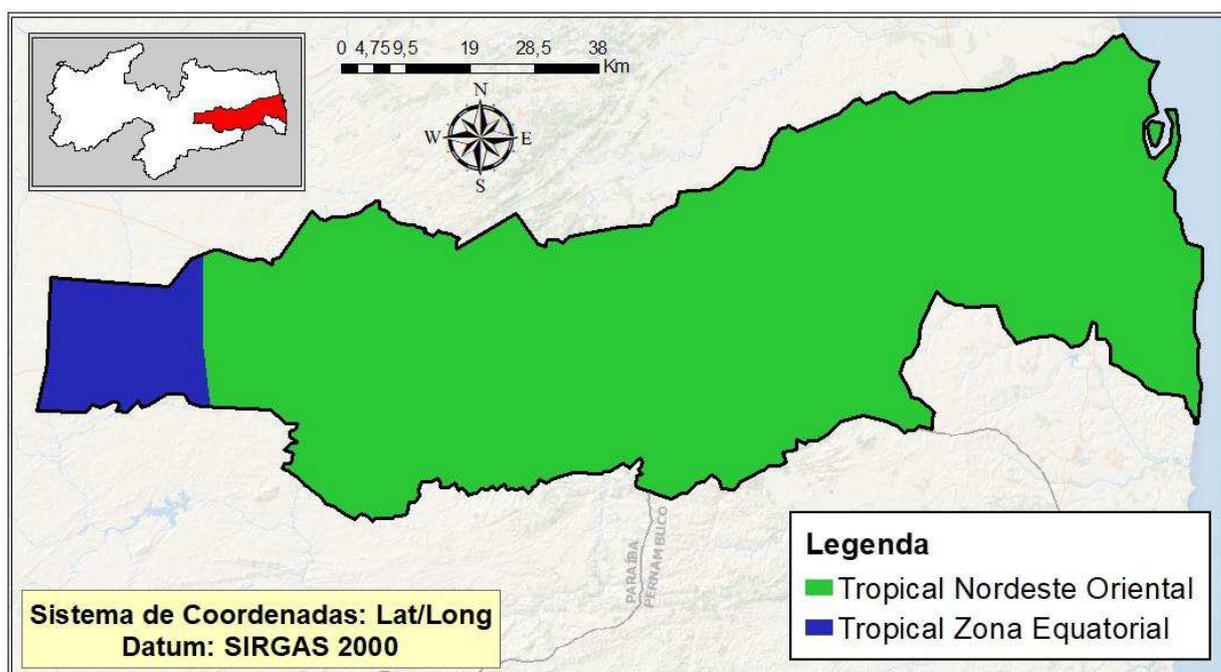


Figura 10. Mapa de climas zonais da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

4.1.2 Geologia

A mesorregião do Agreste Paraibano, segundo Teotia (2011), possui geologia proveniente do terciário, com formação geológica proveniente da era pré-cambriana e caracteriza-se pela presença de gnaisses e migmatitos. Na porção oriental da área de estudo, pertencente a mata Paraibana, é predominante o Cenozóico que está representado por sedimentos do Grupo Barreiras, depósitos colúvio-eluviais, depósitos litorâneos praias, depósitos eólicos litorâneos vegetados, depósitos de mangue e depósitos aluvionares (Programa Geologia do Brasil, 2014).

N Figura 11 observa-se os domínios geológicos da área de estudo, que por sua vez se destacam os Complexos Gnaiss-Migmatíticos, de classe rochosa metamórfica, com predomínio de gnaisses e migmatitos ortoderivados, pouca intensidade fraturada e predominantemente argilo-sílico-arenoso. É possível verificar, também, a presença dos Complexos Granitoides, de classe rochosa ígnea, com séries graníticas subalcalinas, pouca a moderadamente fraturada (distribuição irregular) e predominantemente argilo-sílico-arenoso. Por fim, se destacam os Sedimentos Cenozoicos, de classe rochosa sedimentar, alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa (arenito, siltito, argilito e cascalho), pouco a moderadamente fraturada e variável de arenoso a argilo-siltoso. No Cenozoico, eventos tectônicos e eustáticos potencializaram ciclos denudacionais e deposicionais, que originaram os sedimentos da Formação Barreiras, os vales de rios

afogados, os terraços fluviais e marinhos, dentre outras feições de relevo e ambientes naturais (Maia & Bezerra, 2011).

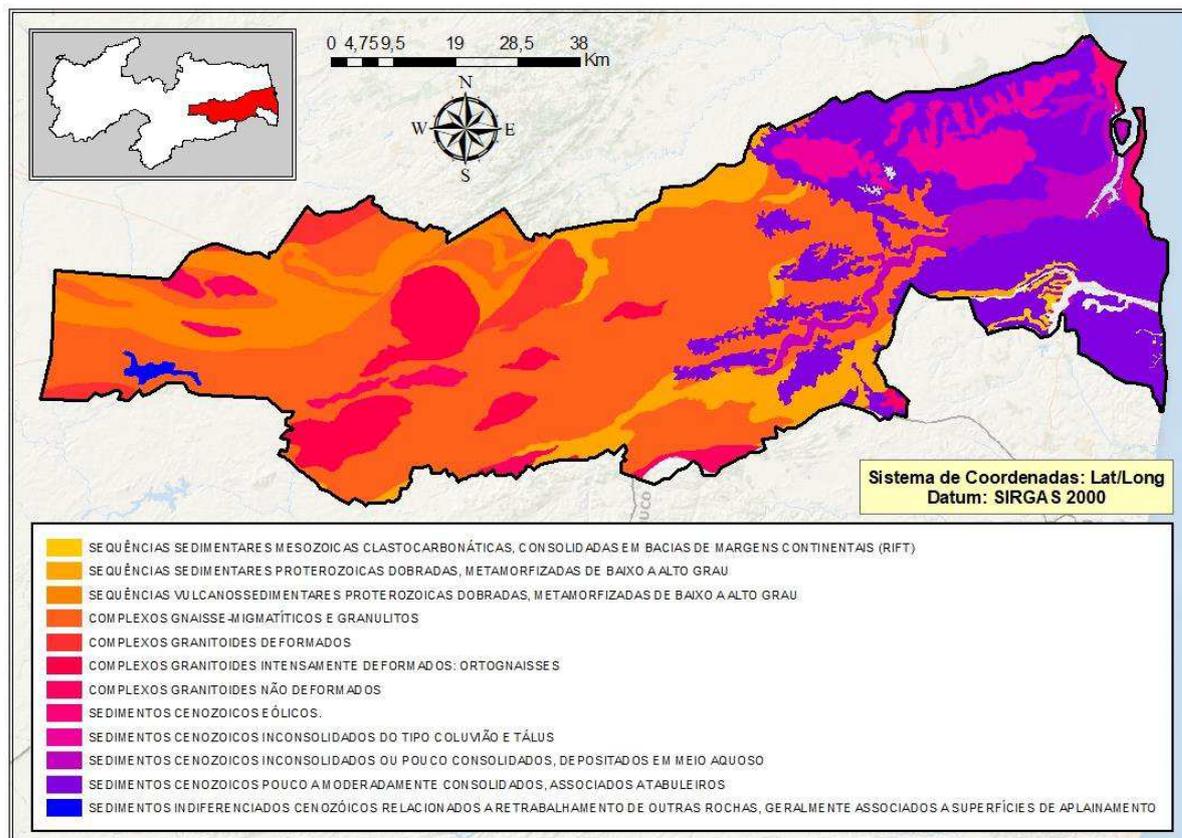


Figura 11. Domínio geológico da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

4.1.3 Relevo

O agreste compreende a zona de transição, situada entre o litoral úmido e o sertão semiárido. Abrange áreas planas e superfícies elevadas da porção oriental do planalto da Borborema, onde se vê a transição entre os brejos úmidos e o sertão das caatingas (PNUD/FAO/IBAMA, 1994). O Planalto da Borborema situa-se na porção central do Estado, com clima do tipo Bsh - Semiárido quente, precipitação predominantemente, abaixo de $600\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, e temperatura mais baixa, devido ao efeito da altitude (400 m a 700 m). As chuvas da região sofrem influência das massas Atlânticas de sudeste e do norte (Francisco et al., 2015).

Os compartimentos geomorfológicos que se apresentam no município de João Pessoa são basicamente: os Baixos Planaltos Costeiros, e as planícies fluviais e marinhas. Os Baixos Planaltos Costeiros são superfícies de idade terciárias, que acompanham todo o litoral do Nordeste do Brasil, em extensão estimada de 8,42 milhões de hectares. Eles estão esculpidos em grande parte sobre os sedimentos mal consolidados da Formação Barreiras,

apresentando como características uma topografia plana a suavemente ondulada, material sedimentar e de baixa altitude, com declividade média inferior a 10% (Barbosa, 2016).

O relevo da área de estudo apresenta em destaque o Pediplano Central do Planalto da Borborema, as Encostas Orientais do Planalto da Borborema e o Piemonte Oriental do Planalto da Borborema representativos do Agreste Paraibano. No litoral da área de estudo é possível observar o domínio dos Tabuleiros Orientais do Nordeste, as Planícies e Terraços Fluviais e o Litoral oriental Nordestino representativos da Mata Paraibana.

4.1.4 Solos

De acordo com Francisco et al. (2015), os solos do tipo Luvisolos Crômicos Planossólicos com relevo suave ondulado e ondulado, associados à Planossolos Solódico nas áreas mais planas e aos Neossolos Litólicos Eutróficos nas áreas mais declivosas, ocorrem na região de caatinga do Agreste, iniciando na área da Planície Atlântica até o sudoeste, nos limites superiores dos contrafortes orientais do Planalto da Borborema, compreendendo as cidades de Campina Grande, Queimadas e Umbuzeiro, na área central da depressão, e ao longo da encosta do Planalto a sudoeste. Predominantes em área de relevo forte ondulado e montanhoso, os Neossolos Litólicos são solos mais rasos e pedregosos e rochosos, são associados a afloramentos de rochas e acompanham a calha do rio Paraíba e a oeste da região, entre as cidades de Itatuba, Alagoa Grande e Campina Grande.

No Agreste contínuo ao Brejo, área de transição para regiões mais secas do interior do Planalto, os solos predominantes na área mais úmida são os Neossolos Regolíticos Distróficos, polarizada pela cidade de Esperança; na área mais seca, ao norte, ocorrem os Neossolos Regolíticos Eutróficos e os Luvisolos Crômico Litólico (Francisco et al., 2015).

No litoral, nas áreas de Tabuleiros, os solos são originados de sedimentos argilosos da era Terciária – formação Grupo Barreiras ao sul (Latosolos e Argissolos), e ao norte, por sedimentos arenosos desta mesma formação (Neossolos Quartzarênicos). Nos tabuleiros costeiros os solos são comumente pobres e ácidos (Francisco et al., 2015).

A ocorrência de solos da área de estudo tem o domínio de solos do tipo Neossolos Litólicos Eutróficos, Planossolos Natricos Orticos, Luvisolos Crômicos Orticos na região do Agreste (oeste da área de estudo). No litoral (leste da área de estudo) é possível verificar o domínio de solos do tipo Argissolos Acinzentados Distrocosos e Argissolos Vermelho-Amarelos Distroficos.

4.1.5 Vegetação

A vegetação predominante da área de estudo é a Caatinga (Figura 9) que, em geral, segundo Prado (2003), podem ser caracterizadas como florestas arbóreas ou arbustivas, compreendendo principalmente árvores e arbustos baixos muitos dos quais têm espinhos, microfilia e algumas características xerofíticas.

Ao leste (litoral) da área de estudo (Mata Paraibana) é possível identificar a presença do bioma Mata Atlântica (Figura 12) onde a vegetação se trata de floresta sempre verde, cujos componentes em geral possuem folhas largas, que é vegetação de lugares onde há bastante umidade o ano todo, mata dos trópicos úmidos e vizinha da costa ou acompanha a costa (Andrade & Santos, 2014). O bioma está em 17 Estados (Alagoas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Paraíba, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Norte, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Sergipe), dos quais 14 são costeiros. Hoje restam apenas 12,4% da floresta que existia originalmente e 80% estão em áreas privadas, segundo a Fundação SOS Mata Atlântica (G1/PB, 2020). A Paraíba só tem 483km² de área remanescente de Mata Atlântica, segundo os Indicadores de Desenvolvimento Sustentável divulgados pelo IBGE, assim, de acordo com dados referentes ao ano de 2012, 90,1% da área original - que era de 5.980km² em todo o estado - já foi desmatada (G1/PB, 2015).

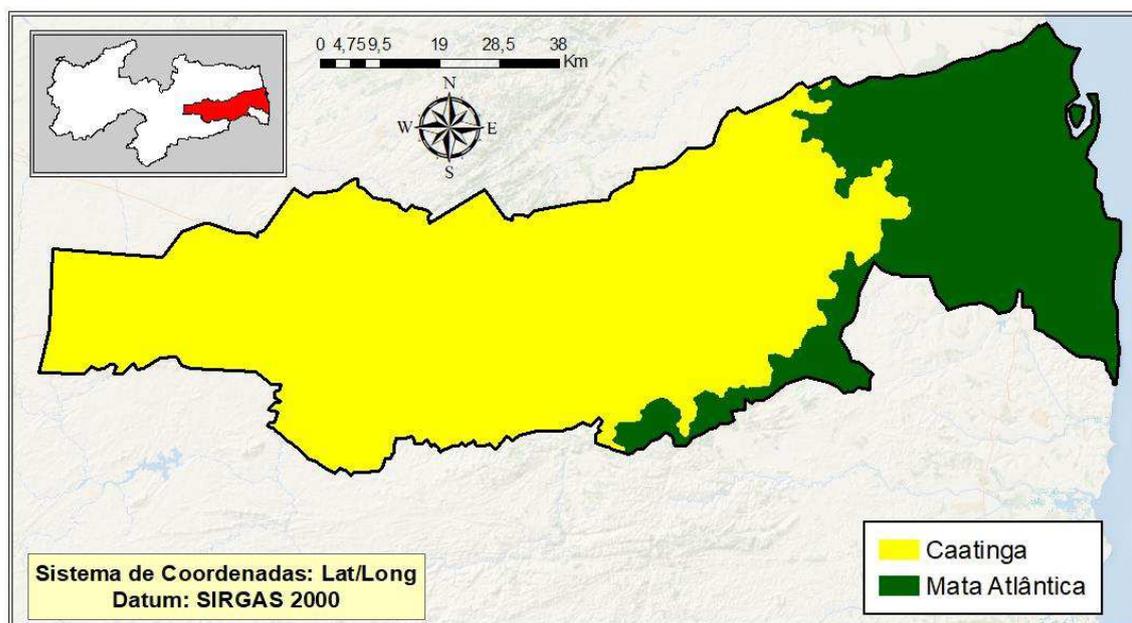


Figura 12. Biomas da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

Na Figura 13 verificou-se um detalhamento da vegetação presente nos biomas da área de estudo. Na região de Caatinga é possível identificar o domínio da Savana-Estépica e

pequenas regiões de Contato entre Savana-Estépica e Floresta Estacional. No bioma de Mata Atlântica encontra-se o domínio da Floresta Estacional Semidecidual, da região de Contato entre Savana e Floresta Estacional, além de uma Formação Pioneira com influência fluviomarinha.

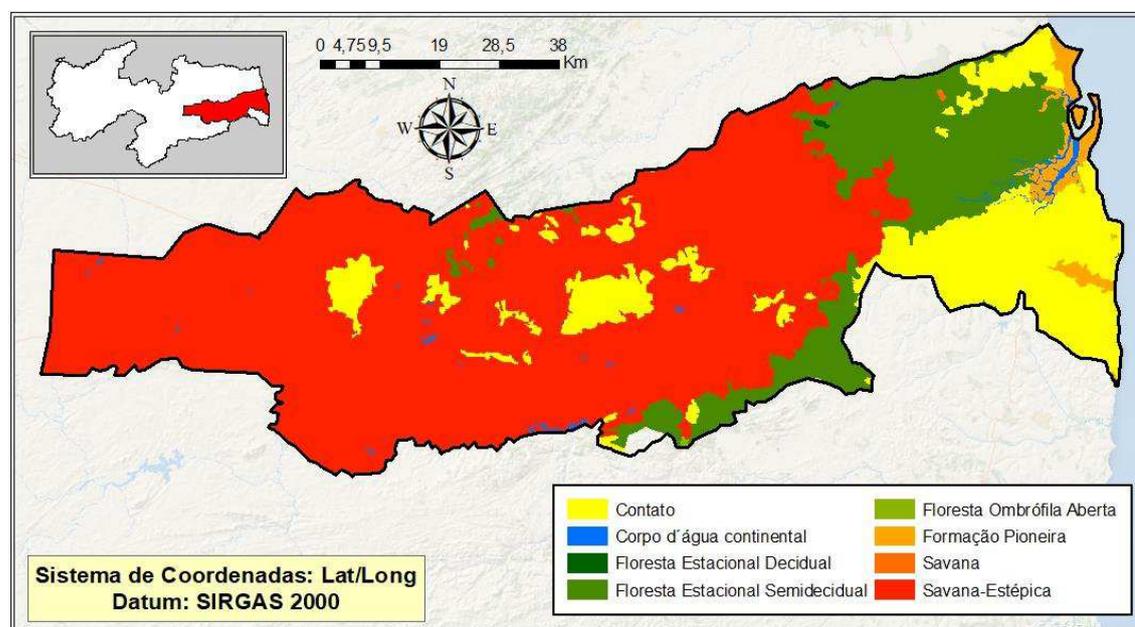


Figura 13. Vegetação da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

4.1.6 Dados socioeconômicos

A mesorregião da Mata Paraibana (porção litorânea) concentra o maior contingente populacional do Estado (37,7%), seguida pelo Agreste (31,8%). A Mata Paraibana, que abrange a área metropolitana de João Pessoa, concentra 53,7% do PIB estadual, seguido pelo Agreste com 27,0%. Além da capital João Pessoa, Campina Grande e Santa Rita (todos inclusos na área de estudo) fazem parte dos municípios mais populosos do estado. Santa Rita é um município vizinho de João Pessoa, tendo grande produção de abacaxi e cana-de-açúcar. Campina Grande é o segundo maior polo industrial e tecnológico da Paraíba, destacando-se em eletrônica e informática, sendo um dos mais avançados centros de tecnologia de programas de computador no Brasil (Bezerra et al., 2015).

Devido as características territoriais, a área de estudo está incluída em duas grandes regiões geoeconômicas: o litoral, caracterizado por clima úmido e constituído predominantemente por remanescente da Mata Atlântica, e o Agreste, região de transição entre o litoral e o semiárido, com vegetação composta por espécies da Mata Atlântica, mas principalmente por espécies da Caatinga. Esta diversidade fitogeográfica confere à Paraíba amplas possibilidades de produção agrícola, de forma que são encontradas no Estado

exploração de cana-de-açúcar na zona da mata e os cultivos de subsistência em todo o semiárido. A cana-de-açúcar é a principal cultura do Estado, tanto em termos de valor de produção quanto de área colhida, sendo de grande importância na geração de postos de trabalho e multiplicação de renda na zona da Mata Paraibana. O abacaxi é a segunda cultura mais importante em termos de valor de produção, produzido predominantemente na Mata e no Agreste paraibano. O Estado é o maior produtor nordestino dessa frutícola, respondendo por 48,0% da produção regional (Bezerra et al., 2015).

Quanto ao uso e ocupação do solo socioeconômicos da área de estudo, Figura 14, é evidente a Agropecuária em toda área, com atividade em destaque para a cana-de-açúcar. É importante citar a presença da Agricultura com Culturas Cíclicas predominante na Mata Paraibana e a influência urbana das cidades de Campina Grande, Santa Rita e João Pessoa.

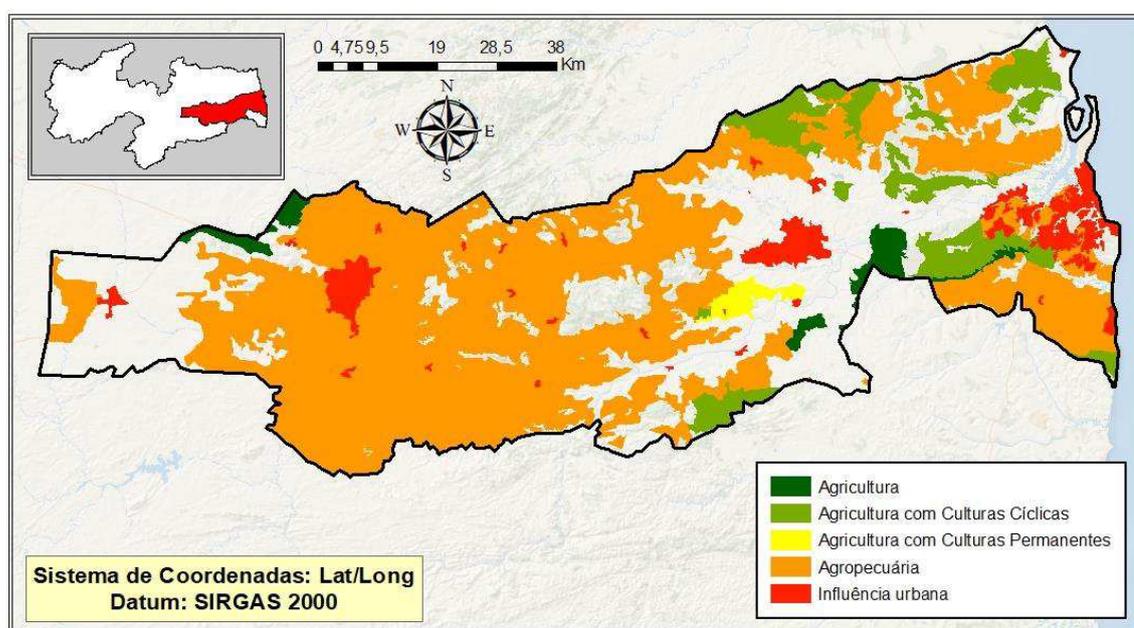


Figura 14. Uso e ocupação socioeconômicos da área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2020).

4.2 Descrição das etapas do trabalho

As principais etapas do trabalho foram desenvolvidas conforme o fluxograma da Figura 15.

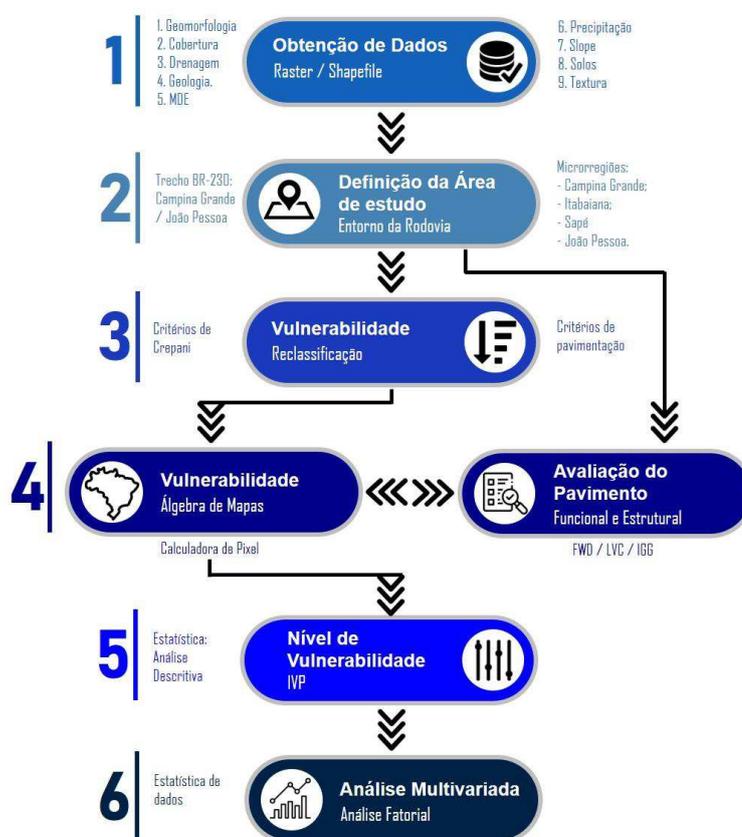


Figura 15. Fluxograma das etapas do trabalho. Fonte: próprio Autor.

4.3 Obtenção de dados

Para a análise da vulnerabilidade ambiental da área de estudo foi preciso fazer a delimitação da área a partir das cartas topográficas e de dados vetoriais, utilizando como critério as microrregiões presentes no trecho de 112km entre as cidades de Campina Grande/PB e João Pessoa/PB da rodovia BR-230. Utilizou-se a metodologia proposta por Crepani et al. (2001) que por sua vez foi desenvolvida com base no conceito de Ecodinâmica de Tricart (1977) e utilização de processamento de imagens de satélites.

O conceito de Tricart (1977) define uma relação entre os processos de morfogênese e pedogênese onde ao predominar a morfogênese prevalecem os processos erosivos modificadores das formas de relevo, e ao predominar a pedogênese prevalecem os processos formadores de solos. As classes utilizadas para caracterização foram: Geomorfologia, Cobertura, Drenagem, Geologia, Modelo Digital de Elevação do terreno (MDE), Precipitação, Declividade (Slope), Solos e Textura. Os dados contidos dentro do projeto,

utilizados para gerar informações da área de estudo, foram originados de diferentes fontes, como por exemplo:

- *Geo Portal da AESA* (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba);
- *BDiA* (Banco de Dados de Informações Ambientais – IBGE) com todos os temas em escala 1:250.000;
- *Geoportal do IBGE* com todos os temas em escala 1:250.000;
- *MAPBIOMAS* (SEEG/OC) com temas em escala 1:100.000;
- *Brasil em Relevo* - Embrapa Monitoramento por Satélite - Conselho Nacional do Ministério Público (CNPMP).

4.4 Classificação da vulnerabilidade

De acordo com a metodologia de Crepani et al. (2001), para cada classe analisada determinou-se um intervalo de valores pré-estabelecidos que por sua vez são associados à vulnerabilidade. Seguindo esta proposta, cada um destes temas recebe uma pontuação de vulnerabilidade variando entre 1,0 e 3,0, onde 1,0 correspondem às áreas consideradas estáveis, 2,0 correspondem à média estabilidade e 3,0 representa as áreas instáveis, com alto índice de vulnerabilidade.

Como o objetivo da pesquisa permeia por criar um Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos (IVP), foi previsto, em alguns casos, a alteração dos valores propostos por Crepani et al. (2001), tendo em vista o contexto característico das classes que gerassem maior ou menor degradação ao pavimento.

4.4.1 Geomorfologia

A geomorfologia é entendida como o estudo científico das formas de relevo da superfície da Terra. Assim, sempre que se pretenda uma completa explicação de qualquer forma da Terra, há que se fazer uma descrição da sua figura geométrica e compreender os processos envolvidos na sua gênese, bem como no seu desenvolvimento através do tempo. Não basta a simples descrição das formas de relevo, torna-se fundamental o conhecimento das características climáticas da região em causa, bem como o conhecimento das características tectônicas, litológicas e biogeográficas, para compreender os processos morfogenéticos (Pedrosa, 2014).

Na metodologia de Crepani et al. (2001), a Geomorfologia oferece, para a caracterização da estabilidade das unidades de paisagem natural, as informações relativas à Morfometria, que influenciam de maneira marcante os processos ecodinâmicos. As

informações morfométricas utilizadas são: a amplitude de relevo, a declividade e o grau de dissecação da unidade de paisagem. Essas informações, relacionadas a forma de relevo da unidade de paisagem natural, permitem que se quantifique empiricamente a energia potencial disponível para o escoamento superficial (“runoff”), isto é, a transformação de energia potencial em energia cinética responsável pelo transporte de materiais que esculpe as formas de relevo. Dessa maneira, entende-se que em unidades de paisagem natural que apresentam valores altos de amplitude de relevo, declividade e grau de dissecação, prevalecem os processos morfogenéticos, enquanto que em situações de baixos valores para as características morfométricas prevalecem os processos pedogenéticos.

No contexto dos pavimentos, em condições geomorfológicas planas, a exemplo de regiões de planícies, devido à baixa inclinação e a dificuldade de escoamento superficial, pode ocorrer inundações localizadas bem como a presença do lençol freático próximo a superfície. De acordo com estudos realizados por Bernucci et al. (2000), os efeitos de sucção e da temperatura na movimentação de águas em pavimentos construídos com solos lateríticos, típicos de regiões tropicais, os efeitos do clima úmido e quente, combinados com as condições hidrológicas e o relevo da região, provocaram umidades de equilíbrio de bases de solos abaixo dos valores utilizados na compactação.

Dessa forma, considerando a presença de água no pavimento como danosa, na Tabela 1, é possível verificar os valores de vulnerabilidade associados às classes de geomorfologia, presentes na área de estudo, antagônicos a metodologia de Crepani et al. (2001), sendo considerado que a vulnerabilidade será maior em regiões com baixa declividade.

Tabela 1. Valores de vulnerabilidade associados às classes geomorfológicas.

Classe Geomorfológica	Critério de Vulnerabilidade
Homogênea Convexa	1,0
Homogênea Aguçada	1,0
Pediaplano Degradado Inundado	2,0
Homogênea Tabular	1,0
Estrutural Tabular	1,0
Planície e Terraços Fluviais	3,0
Planície Fluviomarinha	3,0
Planície Marinha	3,0

Fonte: Autor, 2021.

4.4.2 Geologia

De acordo com Barbosa (2020) a análise do atributo geologia ajuda a entender a morfodinâmica da unidade de paisagem natural, uma vez que permite compreender as informações relativas a história da evolução geológica do ambiente estudado, disponibilizando informações relacionadas a questões ligadas ao grau de coesão das rochas, cujo qual, apresenta uma escala de estabilidade.

O contexto geológico envolve um conjunto de fenômenos físicos, químicos e biológicos que compõe os complexos processos históricos envolvidos na formação geológica local, o estudo desses fatores possibilita a resolução de futuros problemas decorrentes da relação antrópica sobre o meio, possibilitando dessa forma o emprego de uma gestão ambiental que englobe entre outros fatores a investigação das mudanças e das tendências da superfície (Barbosa, 2020).

Para Crepani et al. (2001) o grau de coesão das rochas é a informação básica da Geologia a ser integrada a partir da Ecodinâmica, uma vez que em rochas pouco coesas prevalecem os processos modificadores das formas de relevo, enquanto que nas rochas bastante coesas prevalecem os processos de formação de solos. Para o autor uma vez que em rochas pouco coesas podem prevalecer os processos erosivos, modificadores das formas de relevo (morfogênese), enquanto que nas rochas bastante coesas devem prevalecer os processos de intemperismo e formação de solos (pedogênese).

No contexto da pavimentação é possível seguir os conceitos de vulnerabilidade aplicados por Crepani et al. (2001) tendo em vista que em rochas que sofreram mais com o intemperismo, principalmente químico, provocado pela água, tendem a apresentar solos mais finos que por sua vez podem manifestar características mecânicas de baixa resistência. Crepani et al. (2001) afirmam que o acesso do agente intemperizador (água) e a remoção do produto intemperizado são aspectos importantes a serem considerados com relação ao intemperismo das rochas pois quanto mais o agente intemperizador (água) fica em contato com o mineral, mais ele será intemperizado. Portanto quanto mais porosa a rocha, ou mais fraturada, mais a água pode atacar seus grãos constituintes e mais rapidamente também são retirados os produtos do intemperismo para que novas superfícies do cristal sejam expostas e intemperizadas.

A pesquisa geológica da área de estudo foi gerada a partir de arquivos shapefile na escala de 1:250.000 acessível gratuitamente no Geoportal do IBGE. Na Tabela 2 tem-se os valores de vulnerabilidade associados às classes de geologia.

Tabela 2. Valores de vulnerabilidade associados às classes de geologia.

Classe Geológica	Critério de Vulnerabilidade
Quartzitos ou metaquartzitos	1,0
Riólito, Granito, Dacito	1,1
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulitos	1,2
Migmatitos, Gnaisses	1,3
Fonólito, Nefelina, Sienito, Traquito, Sienito	1,4
Andesito, Diorito, Basalto	1,5
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6
Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7
Piroxenito, Anfíbolito Kimberlito, Dunito	1,8
Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9
Estaurolita xisto, Xisto granatífero	2,0
Filito, Metassiltito	2,1
Ardósia, Metargilito	2,2
Mármore	2,3
Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Grauvacas, Arcózios	2,6
Siltitos, Argilitos	2,7
Folhelhos	2,8
Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporito	2,9
Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc	3,0

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

4.4.3 *Uso e ocupação do solo*

De acordo com Kaliski et al. (2010) algumas formas de uso e exploração dos recursos naturais podem causar desequilíbrio ecológico gerando degradação do meio ambiente. Fenômenos naturais, como a erosão e a inundação, podem ser potencializados por ações antrópicas. A derrubada de vegetação nativa, por exemplo, pode acelerar os processos erosivos.

Segundo Santos et al. (2017) a ocupação do solo urbano sem planejamento tem como consequência, dentre outros impactos ambientais negativos:

i) a sobrecarga no sistema de drenagem urbana por meio do aumento da impermeabilização do solo e da diminuição da infiltração;

ii) a perda da cobertura vegetal por pavimentos impermeáveis, diminuindo a infiltração da água no solo e aumentando a sua quantidade e a sua velocidade de escoamento;

iii) a escassez e a diminuição da qualidade dos recursos hídricos;

iv) o acúmulo de resíduos sólidos nos elementos do sistema de drenagem (canais, bueiros, bocas de lobo, etc.), obstruindo-os e, com isso, ocasionando seus transbordamentos em períodos de chuva; e

v) o aumento da densidade urbana em determinadas zonas, principalmente as consideradas de baixo valor especulativo imobiliário da cidade

As modificações das superfícies naturais para a superfície sintética, efeitos da urbanização, promovem um aumento na temperatura local, principalmente em áreas pavimentadas e com adensamento de construções, gerando um fenômeno conhecido como ilha de calor urbana, diferença de temperatura na área urbana quando comparada com suas áreas de entorno (Romero et al., 2017). Para pavimentos asfálticos, a camada de revestimento é feita, predominantemente, de materiais betuminosos, que são materiais fortemente influenciados pelas variáveis climáticas, entre elas destaca-se a temperatura, que por sua vez, induz à variação de comportamento mecânico e viscoelástico das misturas asfálticas. A temperatura é um fator que influencia diretamente na rigidez e na resistência à fadiga do pavimento, ela afeta negativamente e acelera a deterioração do revestimento asfáltico na estrutura do pavimento, induzindo a ocorrência de defeitos devido as deformações de flexão e compressão nos materiais da estrutura do pavimento (Souza et al., 2019).

Para Crepani et al. (2001) a densidade de cobertura vegetal da unidade de paisagem natural (cobertura do terreno) é um fator de proteção da unidade contra os processos morfogênicos que se traduzem na forma de erosão, por isso para as altas densidades de cobertura os valores atribuídos na escala de vulnerabilidade se aproximam da estabilidade (1,0), para as densidades intermediárias atribuem-se valores intermediários (ao redor de 2,0), e para baixas densidades de cobertura vegetal valores próximos da vulnerabilidade (3,0). A Tabela 3 tem os valores de vulnerabilidade associados às classes de uso e ocupação do solo

Tabela 3. Valores de vulnerabilidade associados às classes de uso e ocupação do solo.

Classes de Uso e Ocupação do Solo	Critério de Vulnerabilidade
Agricultura	2,0
Agropecuária	2,5
Urbanização	3,0
Floresta	1,0
Savana	1,5
Várzeas	2,0
Contato	1,0

Fonte: Autor, 2021.

4.4.4 Drenagem

Para Silva et al. (2009), no campo da análise geomorfológica, a análise de padrões morfométricos, como a densidade de drenagem, serve como ferramenta auxiliar para a reconstrução da dinâmica dos sistemas de superfície terrestre, na medida em que explicitam como os padrões de dissecação, elaborados pela drenagem, podem ser controlados pela estrutura geológica e pelas relações morfoestratigráficas de uma determinada área.

De acordo com Pereira (2003) inúmeros trabalhos indicam que desde o início do século XIX os projetistas rodoviários já haviam constatado que a água em excesso na estrutura do pavimento reduzia sua vida útil, processo este evidenciado pelo acelerado surgimento de defeitos funcionais e estruturais nos pavimentos não drenados. Variações relativamente pequenas da altura do lençol freático podem provocar, na estrutura do pavimento, condições desfavoráveis de umidade que, por ser constituída por solo de baixa qualidade, provocará precoce aparecimento de defeitos na superfície da estrada.

A Tabela 4 tem os valores de vulnerabilidade associados às classes de densidade de drenagem presentes na área de estudo.

Tabela 4. Valores de vulnerabilidade associados às classes de densidade de drenagem.

Classes de Densidade de Drenagem	Critério de Vulnerabilidade
Média	1,0
Baixa	2,0
Muito baixa	3,0

Fonte: Autor, 2021.

4.4.5 Modelo digital de elevação

Os Modelo Digitais de Elevação (MDE) são muito utilizados nas análises geomorfométricas, pois possuem coberturas contínuas de áreas extensas e podem ser trabalhados de modo automatizado em softwares específicos. Essas ferramentas vêm se tornando cada vez mais acessíveis, precisas e robustas. Os MDEs vêm sendo utilizados em distintos trabalhos relacionados a análises ambientais. Tais como, estudos relacionados ao mapeamento digital de solos, análises de bacias hidrográficas, identificação de suscetibilidade a processos movimentos gravitacionais em encostas e também na classificação e compartimentação de formas de relevo (Mello & Silveira, 2018). Segundo Barbosa (2020), o MDE é uma representação numérica de elementos do relevo desconsiderando atributos acima da superfície como: vegetação, edificações e outros objetos.

Seguindo o mesmo critério para a vulnerabilidade de pavimentos, explicado no tópico de Geomorfologia (3.4.1), na Tabela 5 tem-se os valores de vulnerabilidade associados às classes de Amplitude Altimétrica (m) que foram considerados para o MDE, antagônicos a metodologia de Crepani et al. (2001), sendo considerado que a vulnerabilidade será maior em regiões com baixa amplitude altimétrica.

O MDE utilizado nessa pesquisa foi oriundo do projeto Brasil em Relevo (Embrapa Monitoramento por Satélite/Conselho Nacional do Ministério Público - CNPM) com as seguintes características técnicas:

- 90 metros de resolução espacial;
- Compatível com a escala 1:250.000 (IBGE);
- Gerados por interferometria de radar: o sinal emitido é recebido por duas antenas separadas por uma distância fixa (60 m), permitindo assim o cálculo da elevação da superfície, com uma acurácia vertical absoluta de 16 metros (90% confiança);
- Os dados originais foram obtidos em formato raster, com resolução radiométrica de 16 bits, em formato HGT, projeção geográfica, elevações referenciadas para o geóide WGS84 EGM96 e datum horizontal WGS84;
- Os MDEs foram originários da missão de mapeamento do relevo terrestre SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), desenvolvido pela NASA (National Aeronautics and Space Administration) e NGA (National Geospatial-Intelligence Agency) dos Estados Unidos em 2000;
- Os dados obtidos pelo mapeamento foram disponibilizados pelo USGS Eros Data Center (United States Geological Survey).

Tabela 5. Valores de vulnerabilidade associados às classes de da vulnerabilidade referente a amplitude altimétrica.

Classes de Amplitude Altimétrica (m)	Critério de Vulnerabilidade
<20	3,0
20 – 29,5	2,9
29,5 – 39	2,8
39 – 48,5	2,7
48,5 – 58	2,6
58 – 67,5	2,5
67,5 – 77	2,4
77 – 84,5	2,3
84,5 – 94	2,2
94 – 103,5	2,1
103,5 – 113	2,0
113 – 122,5	1,9
122,5 – 132	1,8
132 – 141,5	1,7
141,5 – 151	1,6
151 – 160,5	1,5
160,5 – 170	1,4
170 – 179,5	1,3
179,5 – 189	1,2
189 – 200	1,1
>200	1,0

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

4.4.6 Precipitação pluvial

Para Calbete (2013) a precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes para os estudos climáticos das diversas regiões do Brasil. Tal importância deve-se às consequências que estas podem ocasionar, quando ocorridas em excesso (precipitação intensa), para os setores produtivos da sociedade tanto econômico e social (agricultura, transporte, hidrologia, etc), causando enchentes, assoreamento dos rios, quedas de barreiras, etc.

De acordo com Crepani et al. (2001) as principais características físicas da chuva envolvidas nos processos erosivos são: a quantidade ou pluviosidade total, a intensidade ou intensidade pluviométrica e a distribuição sazonal. Dentre as três características é especialmente importante se conhecer a intensidade pluviométrica porque representa uma relação entre as outras duas (quanto chove / quando chove), resultado que determina, em última análise, a quantidade de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética. Os valores de intensidade pluviométrica podem ser considerados representantes de valores de energia potencial disponível para transformar-se em energia cinética responsável pela erosividade da chuva, logo podemos dizer que quanto maiores os valores da intensidade

pluviométrica maior é a erosividade da chuva e podemos criar uma escala de erosividade da chuva que represente a influência do clima nos processos morfodinâmicos.

Os dados contendo o quantitativo pluviométrico de cada cidade do estado da Paraíba foram obtidos no Geoportal da Agência Executiva de Águas da Paraíba (AESPA). A Figura 16 tem os postos pluviométricos selecionados para área de estudo, totalizando 44 postos. As informações mais detalhadas sobre cada posto encontram-se no ANEXO I.

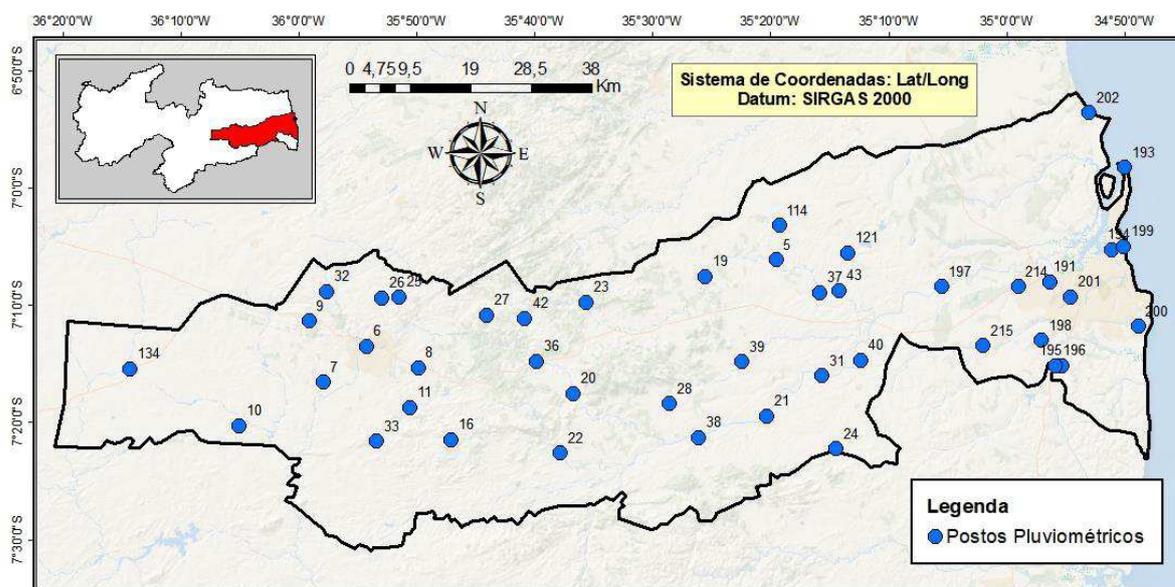


Figura 16. Postos pluviométricos da área de estudo. Fonte: próprio Autor.

Foi selecionada a pluviometria mensal por posto pluviométrico referentes a série histórica de 25 anos, entre os dias 01/01/1994 e 31/12/2019. Como o objetivo era identificar as chuvas mais intensas, os dados foram refinados em planilha eletrônica calculando o máximo acumulado mensal do ano. As maiores precipitações por ano, para cada cidade, foram exportadas para ambiente SIG e a partir daí foi feita a seleção das cidades que fazem parte das microrregiões pertencentes a área de estudo. Na Tabela 6, nota-se os valores de vulnerabilidade associados às classes de intensidade pluviométrica (mm/mês).

Tabela 6. Valores de vulnerabilidade associados às classes de intensidade pluviométrica.

Intensidade Pluviométrica (mm/mês)	Critério de Vulnerabilidade
<50	1,0
50 – 75	1,1
75 – 100	1,2
100 – 125	1,3
125 – 150	1,4
150 – 175	1,5
175 – 200	1,6
200 – 225	1,7
225 – 250	1,8
250 – 275	1,9
275 – 300	2,0
300 – 325	2,1
325 – 350	2,2
350 – 375	2,3
375 – 400	2,4
400 – 425	2,5
425 – 450	2,6
450 – 475	2,7
475 – 500	2,8
500 – 525	2,9
>525	3,0

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

4.4.7 Declividade (Slope)

De acordo com Crepani et al. (2001) o termo declividade refere-se à inclinação do relevo em relação ao horizonte. Para Silveira et al. (2006), estabelecendo uma relação existente entre a declividade e a dinâmica superficial das águas, quanto maior for o ângulo clinográfico, mais rapidamente a energia potencial das águas pluviais se transforma em energia cinética, aumentando a velocidade das massas de água e sua capacidade de transporte, responsável pelos processos erosivos. O autor afirma que a declividade das vertentes possibilita evidenciar a distribuição das inclinações de uma superfície do terreno na paisagem.

Oliveira (2017) afirma que os valores de declividade podem ser expressos em percentual (%) e/ou em graus (°). As informações obtidas a partir deste mapa poderão orientar ações que enfoquem a delimitação de Área de Preservação Permanente (APP), áreas sujeitas à inundação, áreas com possibilidades de mecanização da agricultura, limites para parcelamento e uso do solo, e demais aplicações destinadas ao planejamento urbano e ambiental. A partir do input raster do MDE, por meio do software ARCGIS para Desktop, versão 10.6.1, utilizou-se a ferramenta Slope disponível no ArcToolbox e obteve-se o mapeamento da declividade com resultado final calculado em porcentagem. Dessa forma na

Tabela 7 tem-se os valores de vulnerabilidade associados às classes de Declividade, antagônicos a metodologia de Crepani et al. (2001), sendo considerado que a vulnerabilidade para o pavimento será maior em regiões com baixa declividade.

Tabela 7. Valores de vulnerabilidade associados às classes de declividade.

Declividade		Critério de Vulnerabilidade
Grau (°)	%	
< 2	< 3,5	3,0
2 – 3,3	3,5 – 5,8	2,9
3,3 – 4,6	5,8 – 8,2	2,8
4,6 – 5,9	8,2 – 10,3	2,7
5,9 – 7,3	10,3 – 12,9	2,6
7,3 – 8,6	12,9 – 15,1	2,5
8,6 – 9,9	15,1 – 17,4	2,4
9,9 – 11,2	17,4 – 19,8	2,3
11,2 – 12,5	19,8 – 22,2	2,2
12,5 – 13,8	22,2 – 24,5	2,1
13,8 – 15,2	24,5 – 27,2	2,0
15,2 – 16,5	27,2 – 29,6	1,9
16,5 – 17,8	29,6 – 32,1	1,8
17,8 – 19,1	32,1 – 34,6	1,7
19,1 – 20,4	34,6 – 37,2	1,6
20,4 – 21,7	37,2 – 39,8	1,5
21,7 – 23,0	39,8 – 42,4	1,4
23,0 – 24,4	42,4 – 45,3	1,3
24,4 – 25,7	45,3 – 48,1	1,2
25,7 – 27	48,1 – 50	1,1
> 27	> 50	1,0

Fonte: Adaptado de Ribeiro & Campos, (2007).

4.4.8 Solos e Textura

Para Crepani et al. (2001) a Pedologia participa da caracterização morfodinâmica das unidades de paisagem natural fornecendo o indicador básico da posição ocupada pela unidade dentro da escala gradativa da Ecodinâmica: a maturidade dos solos. A maturidade dos solos, produto direto do balanço morfogênese/pedogênese, indica claramente se prevalecem os processos erosivos da morfogênese que geram solos jovens, pouco desenvolvidos, ou se, no outro extremo, as condições de estabilidade permitem o predomínio dos processos de pedogênese gerando solos maduros, lixiviados e bem desenvolvidos.

Na metodologia de Crepani et al. (2001) a maior ou menor suscetibilidade de um solo a sofrer os processos erosivos da morfogênese depende de diversos fatores e os mais importantes são: estrutura do solo, tipo e quantidade das argilas, permeabilidade e profundidade do solo e a presença de camadas impermeáveis.

A erosão é o processo pelo qual ocorre a desagregação e transporte das partículas que constituem o solo. Um dos principais agentes da erosão é a água, a partir do impacto das gotas de chuva no terreno, produzindo desagregação das partículas. Acresce que, em função de suas propriedades físicas (absorção d'água, permeabilidade, porosidade, etc), os solos serão mais ou menos vulneráveis a erosão (Faria et al., 2003). A intensidade da ação intempérica depende do clima. O intemperismo é muito mais acentuado, por exemplo, em climas úmidos do que em climas secos. Por outro lado, a resistência dos minerais à sua ação também é variável. Olivinas e piroxênios são minerais que se alteram mais facilmente que as micas, e o quartzo não se altera nem física nem quimicamente. Mas, ao fim de um processo de intenso intemperismo, restam de uma rocha apenas quartzo (sílica livre) e argilas. Assim, pode-se dizer, de um modo geral, que as argilas são os produtos finais do processo de intemperismo das rochas (Branco, 2014).

Para Passos et al. (2018) alguns solos possuem grandes quantidades de partículas finas (silte e argila), que os tornam inadequados para fins de pavimentação, isso ocorre devido às interações desfavoráveis entre suas partículas e a água causando efeitos negativos como diminuição da coesão e problemas relacionados à expansão e contração, reduzindo assim sua resistência.

Nesse sentido a Tabela 8 tem-se os valores de vulnerabilidade associados às classes de Solos e na Tabela 9 os valores de vulnerabilidade associados às classes de Textura dos Solos presentes na área de estudo. O mapa temático de solos na escala 1:250.000 foi obtido no BDIA (Banco de Dados de Informações Ambientais – IBGE), que por sua vez, é fruto da parceria entre a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e o IBGE. O mapa contém os principais tipos de solos segundo as especificações e nomenclatura indicadas pelo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS (EMBRAPA, 2018).

Tabela 8. Valores de vulnerabilidade associados às classes de solo.

Classes de Solo	Critério de Vulnerabilidade
Latossolos	1,0
Argissolos	2,0
Luvissolos	2,0
Chernossolos	2,0
Planossolos	2,0
Espodossolos	2,0
Cambissolos	2,5
Neossolos	3,0
Vertissolos	3,0
Organossolos	3,0
Gleissolos	3,0
Plintossolos	3,0
Afloramento Rochoso	3,0

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

Tabela 9. Valores de vulnerabilidade associados às classes de textura do solo.

Classes de Textura do Solo	Critério de Vulnerabilidade
Arenosa	1,0
Arenosa média	1,0
Arenosa/argilosa	2,0
Argilosa média	3,0
Argilosa	3,0

Fonte: Autor, 2021.

4.5 Álgebra de mapas para cálculo do IVP

De acordo com Crepani et al. (2001) o modelo de vulnerabilidade é aplicado individualmente aos temas (Geologia, Geomorfologia, Solos, Vegetação e Clima) que compõem cada unidade territorial básica, que recebe posteriormente um valor final, resultante da média aritmética dos valores individuais segundo uma equação empírica (Equação 1), que busca representar a posição desta unidade dentro da escala de vulnerabilidade natural à perda de solo:

$$V = \frac{(G + R + S + Vg + C)}{5} \quad (1)$$

onde:

V = Vulnerabilidade;

G = vulnerabilidade para o tema Geologia;

R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

S = vulnerabilidade para o tema Solos;

Vg = vulnerabilidade para o tema Vegetação e;

C = vulnerabilidade para o tema Clima.

Seguindo a mesma metodologia de Crepani et al. (2001), no que se diz respeito ao cálculo da média aritmética dos valores individuais de vulnerabilidade, a Equação (2) contém o cálculo com o acréscimo de outros temas julgados como importantes e que possam trazer informações complementares sobre a vulnerabilidade associada ao pavimento.

$$IVP = \frac{(R + C + D + G + MDE + P + SL + S + T)}{9} \quad (2)$$

onde:

IVP = Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos;

R = vulnerabilidade para o tema Geomorfologia;

C = vulnerabilidade para o tema Cobertura;

D = vulnerabilidade para o tema Drenagem;

G = vulnerabilidade para o tema Geologia;

MDE = vulnerabilidade para o tema Modelo Digital de Elevação;

P = vulnerabilidade para o tema Precipitação;

SL = vulnerabilidade para o tema Slope;

S = vulnerabilidade para o tema Solos e;

T = vulnerabilidade para o tema Textura.

Desse modo, foi gerado o mapa de vulnerabilidade que sintetiza a soma das variáveis a partir da álgebra de mapas, ou seja, aplicou-se a sobreposição de vários mapas utilizando uma escala comum e pesos de vulnerabilidade para cada classe conforme sua importância. A ferramenta, responsável pelo resultado, foi a Calculadora de Raster do ArcGIS Spatial Analyst (ARCGIS para Desktop 10.6.1), encarregada de executar cálculos matemáticos com operadores e funções, configurar consultas de seleção ou digitar a sintaxe da álgebra de mapa.

4.6 Níveis de vulnerabilidade do IVP

Em posse do mapa de vulnerabilidade, com todos os valores médios calculados para cada pixel, utilizou-se da estatística descritiva para determinar os intervalos e definir o grau de vulnerabilidade (Tabela 10). Na criação dos intervalos foi utilizada a amplitude interquartil, ou distância interquartil, pois é uma medida de dispersão que não sofre a influência de valores extremos. Os quantis dividem os valores ordenados em “q” partes essencialmente iguais, ou em “q” partes com a mesma proporção de valores. Pode-se

interpretar os quantis como medidas de posição. Diversas medidas de dispersão podem ser definidas a partir de quantis, a mais utilizada delas é a distância interquartil.

Tabela 10. Escala de vulnerabilidade para pavimentação.

Intervalo IVP	Grau de Vulnerabilidade	Grau de Saturação			Cores
		Verm.	Verde	Azul	
1,00 – 1,98	Estável	0	0	255	
1,98 – 2,12	Moderadamente Estável	0	255	255	
2,12 – 2,27	Medianamente Estável	102	255	0	
2,27 – 2,39	Moderadamente Vulnerável	255	255	0	
2,39 – 2,51	Vulnerável	255	102	0	
2,51 – 3,00	Extremamente Vulnerável	255	0	0	

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

4.7 Avaliação de Pavimentos

Segundo Bernucci et al. (2022), para garantir que os pavimentos desempenhem as suas funções de trafegabilidade, conforto e segurança em quaisquer condições climáticas, é necessário observá-los constantemente de forma a detectar os primeiros sinais de anomalias e acompanhar a sua evolução a fim de intervir no momento oportuno para possíveis correções que possam vir a minimizar a evolução dos defeitos. O desempenho do pavimento pode ser avaliado sob três aspectos: funcional, estrutural e de segurança. A chamada avaliação funcional concentra-se nas imperfeições da superfície e seus efeitos, a avaliação estrutural envolve a determinação da capacidade de carga do pavimento para garantir seu desempenho a longo prazo e a avaliação de segurança se preocupa com a adesão do pneu ao pavimento, em quaisquer condições de clima.

4.7.1 Levantamento Visual Contínuo – LVC

O método funcional utilizado foi o Levantamento Visual Contínuo (LVC) normatizado pelo DNIT 008/2003 – PRO, onde o objetivo é contabilizar as patologias existentes no trecho afim de avaliar superficialmente as condições do pavimento. O método adota as nomenclaturas e as definições da Norma do DNIT 005/2003 – TER em relação aos diferentes tipos de defeitos. Para o procedimento é preferível que a equipe seja composta por, no mínimo, dois técnicos, além do motorista do veículo que, por sua vez, deve ser operado a uma velocidade média aproximada de 40km/h percorrendo a rodovia em um único sentido. Para o trecho em questão, pista dupla, o LVC foi realizado separadamente para cada uma das pistas, levando-se em consideração simultaneamente as duas ou mais faixas de rolamento de cada uma dessas pistas.

O processo de avaliação usado no LVC consta do preenchimento de um formulário de acordo com as instruções da norma. O avaliador deve fazer a divisão dos trechos em segmentos, com extensão mínima de 1km, havendo uma homogeneidade dos defeitos o segmento pode ser maior (máximo de 6km).

Em resumo, para cada defeito encontrado, no trecho avaliado, são registradas as frequências do mesmo (A = Alta; M = média e B = baixa) onde a porcentagem e a qualidade foram avaliadas pela tabela de frequência de defeitos da norma. O cálculo do Índice de Condição dos Pavimentos Flexíveis (ICPF) é feito de acordo com o cálculo da média dos índices contidos no Formulário do Levantamento avaliados por dois ou mais avaliadores. O cálculo do Índice de Gravidade Global Expedito (IGGE) é realizado semelhante ao método da norma DNIT 006/2003-PRO, pela média dos dados contidos no Formulário do Levantamento. O Índice do Estado da Superfície (IES), onde os valores estão entre 0 a 10, é avaliado em função do ICPF e do IGGE.

O LVC proporciona, além da vantagem de determinar o ICPF que é semelhante ao VSA, os elementos necessários para avaliação do Índice de Gravidade Global – IGG (DNIT-IPR – 745, 2011).

4.7.2 *Índice de Gravidade Global (IGG)*

A norma DNIT 006/2003 – PRO estabelece um método de levantamento de defeitos e cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG), que é uma forma de avaliar objetivamente a superfície de um pavimento flexível ou semirrígido. Nas rodovias de pista dupla as estações são inventariadas, a cada 20m, na faixa mais solicitada pelo tráfego, em cada uma das pistas. A superfície de avaliação corresponde a 3m ré e 3m vante a cada uma das estacas demarcadas, totalizando em cada estação uma área aproximada de 6m de extensão e largura igual à da faixa (Figura 17a). A anotação é feita numa planilha, apresentada em norma, utilizando termos e códigos dos tipos de defeitos. A medição dos afundamentos nas trilhas de roda externa e interna é feita com o auxílio da treliça metálica (Figura 17b).

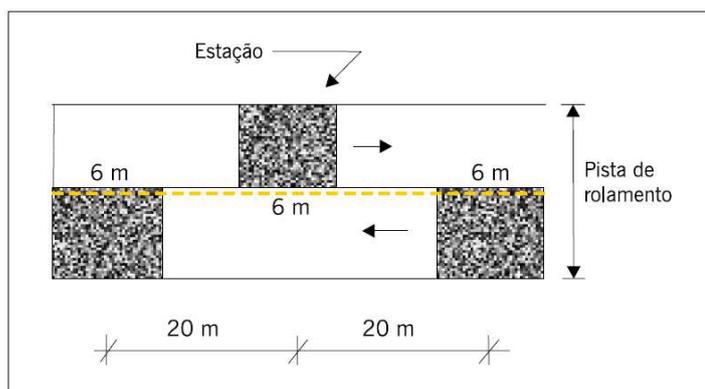


Figura 17a

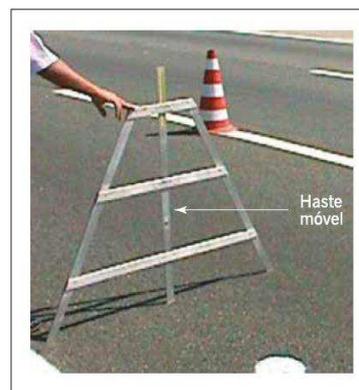


Figura 17b

Figura 17. Exemplo de demarcação de áreas para inventário de defeitos (Figura 18a). Treliça metálica para medida dos afundamentos em trilhas de roda (Figura 18b). Fonte: Bernucci et al. (2022).

O procedimento calcula as frequências absolutas (f_a) de cada um dos tipos de defeitos e uma frequência (f_r), relativa ao número de estações do segmento (Equação 3). A norma aponta para a prioridade de consideração da frequência absoluta de defeitos do tipo 3 sobre tipo 2 e tipo 1, de tipo 2 sobre tipo 1, contabilizando o tipo 1 apenas quando este for único na estação, priorizando, dessa forma, a contagem do tipo mais grave.

$$f_r = \frac{f_a \times 100}{n} \quad (3)$$

sendo:

f_r : frequência relativa;

f_a : frequência absoluta;

n : número de estações inventariadas.

O cálculo do Índice de Gravidade Individual (IGI) é composto utilizando um fator de ponderação prefixado para cada defeito estabelecido em norma, dependendo da gravidade daquele tipo de defeito (Equação 4).

$$IGI = f_r \times f_p \quad (4)$$

sendo:

IGI: Índice de Gravidade Individual de cada tipo de defeito;

f_r : frequência relativa;

f_p : fator de ponderação.

O IGI para as flechas externas e internas é calculado a partir de condições normatizadas que levam em consideração fatores de ponderação dependentes do cálculo da média e da variância das flechas. A existência de trilhas de roda nos segmentos pode elevar consideravelmente o valor do índice de gravidade global, que por sua vez é calculado pela Equação (5).

$$IGG = \sum IGI \quad (5)$$

sendo:

IGG: Índice de Gravidade Global do segmento analisado;

IGI: Índices de Gravidade Individual calculados para cada um dos oito tipos de defeitos somado as trilhas de roda.

A norma DNIT 06/2003 representa o grau de degradação, atribuindo ao pavimento inventariado um conceito a partir de faixas com base no valor do IGG (Tabela 11).

Tabela 11. Conceitos de degradação do pavimento em função do IGG

Conceito	Limites
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Fonte: DNIT 006/2003 – PRO.

4.7.3 Irregularidade Longitudinal

Considera-se irregularidade longitudinal o somatório dos desvios da superfície de um pavimento, quando relacionado a um plano ideal de referência. Essa irregularidade afeta a condução do veículo, o efeito das cargas, a qualidade ao rolamento e a drenagem da via. O índice estatístico internacional para a medida da irregularidade é denominado de IRI (International Roughness Index), ou Índice de Irregularidade Internacional, expresso em m/km (Bernucci et al., 2022).

No Brasil a medição de irregularidade pelo equipamento IPR/USP é normatizada pela DNER-PRO 182/94 e a calibração e controle de sistemas medidores de irregularidade de superfície de pavimento pelo procedimento DNER-PRO 164/94. O SMITR, medidor de irregularidade tipo resposta, tem por objetivo fornecer leituras correspondentes à irregularidade da superfície, e consiste em um conjunto constituído por um instrumento de medição responsivo colocado em um veículo de passeio (Figura 18).



Figura 18. Sistema medidor do tipo resposta SMITR instalado no veículo. Fonte: Adaptado de ANTT (2017).

Esse equipamento fornece valores de QI (quociente de irregularidade) que de acordo com Bernucci et al. (2022) pode ser numericamente relacionado ao IRI utilizando as Equações 6 e 7.

$$QI = 13 \times IRI \quad (6)$$

$$IRI = (QI+10)/ 14 \quad (7)$$

sendo:

QI: quociente de irregularidade;

IRI: Índice de Irregularidade Internacional.

A condição da superfície do pavimento referentes ao IRI está distribuída em quatro faixas conforme Tabela 12, a seguir:

Tabela 12. Classificação de irregularidade superficial

Conceito	Limites
Bom	$IRI < 3$
Regular	$3 \leq IRI < 4$
Mau	$4 \leq IRI < 5,5$
Péssimo	$IRI \geq 5,5$

Fonte: Adaptado de DNIT (2011).

4.7.4 Falling Weight Deflectometer (FWD)

De acordo com Balbo (2007) a capacidade estrutural do pavimento pode ser medida por meio de provas de carga, submetendo a estrutura a uma carga normatizada e realizando a medição das deformações impostas. Os deslocamentos verticais sofridos no pavimento quando exposto a atuação de uma carga são chamados de deflexões. No Brasil e no mundo,

dois tipos de equipamentos são utilizados para medir essas deflexões, a viga de Benkelman e o defletômetro de impacto Falling Weight Deflectometer (FWD).

A determinação das deflexões utilizando o defletômetro de impacto tipo FWD é normatizada pelo DNER-PRO 273/96 e a calibração da célula de carga e dos sensores de deflexão dos defletômetros pela norma DNIT 132/2010 - PRO. As normas descrevem o uso automatizado do equipamento, rebocado por um veículo com sistema de aquisição de dados através de computador. No ensaio é aplicada uma carga de impacto conhecida e após isso é feita a leitura dos deslocamentos em vários sensores chamados de geofones colocados ao longo do equipamento. Um dos parâmetros mais importantes para a compreensão do comportamento da estrutura no ensaio é a deflexão recuperável máxima (d_0) com ordem de grandeza de 10^{-2} mm sendo este o mais expressivo valor medido entre os sensores, quanto maior o resultado do seu valor, maior o comprometimento da estrutura. A Figura 19a apresenta um modelo de FWD existente no país e a Figura 19b o desenho esquemático da bacia de deflexão gerada pelo equipamento.



Figura 19a

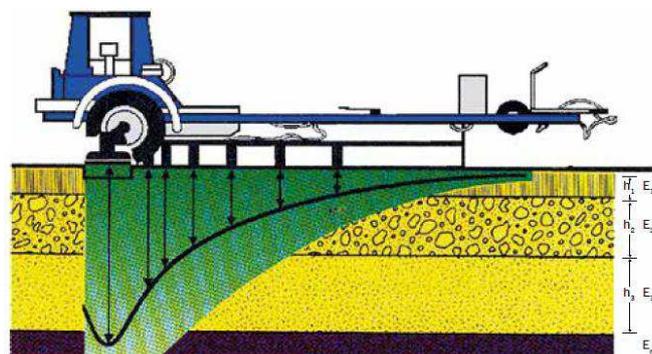


Figura 19b

Figura 19. Vista geral de um modelo de FWD existente no país (Figura 20a). Desenho esquemático do FWD e representação fora de escala da bacia de deflexão (Figura 20b).
Fonte: Bernucci et al. (2022).

Para análise estatística das deflexões recuperáveis de um determinado trecho a norma DNER-PRO 011/79, afim de calcular a deflexão característica que representa um segmento, adota um procedimento aplicado na tabulação da sequência de deflexões encontradas. Utilizando as medidas individuais de deflexão (D) calcula-se:

$$\text{Valores médios} \quad \bar{D}_i = \frac{\sum D_i}{n} \quad (8)$$

$$\text{Desvio padrão} \quad S = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n-1}} \quad (9)$$

$$\text{Limite superior} \quad LS = \bar{D} + Z \times S \quad (10)$$

$$\text{Limite inferior} \quad LI = \bar{D} - Z \times S \quad (11)$$

$$\text{Deflexão característica} \quad D_c = \bar{D} + S \quad (12)$$

sendo:

Z: coeficiente indicado na Tabela 13;

S: desvio padrão;

\bar{D} : valores médios;

D_i : valores de deflexão individual;

D_c : deflexão característica;

N: número total de medidas de cada segmento.

Uma faixa de valores individuais aceitáveis (D_i) deve ser estabelecida com o objetivo de eliminar quaisquer medidas extremas estatisticamente inaceitáveis, essa faixa deve estar dentro do intervalo definido pelo limite inferior e superior.

Tabela 13. Valor do coeficiente Z para definição da deflexão característica

n	Z
3	1
4	1,5
5 – 6	2
7 – 19	2,5
≥ 20	3

Fonte: DNER-PRO 011/79.

Afim de evitar o surgimento de defeitos na estrutura do pavimento é necessário manter a deflexão característica, para um determinado segmento, abaixo de um valor de deflexão admissível (D_{adm}). Segundo a norma DNER-PRO 011/79 essa deflexão depende dos materiais que constituem a base, o revestimento do pavimento e o tráfego relacionado ao número N de solicitações do eixo equivalente padrão de 8,2 t, calculado segundo o Manual de Estudo de Tráfego (IPR – 723, 2006). A norma sugere o uso da Equação 13 para cálculo do valor da deflexão admissível em 0,01mm.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176 \log N \quad (13)$$

sendo:

D_{adm} : Deflexão admissível;

N: número de solicitações do eixo equivalente padrão de 8,2 t.

Na Tabela 14, nota-se possíveis valores de D_{adm} para diferentes valores de número N de solicitações do eixo equivalente padrão de 8,2 t.

Tabela 14. Valores de D_{adm} para diferentes valores de número N.

N	D_{adm}
10^5	135
10^6	90
10^7	60
10^8	40

Fonte: DNER-PRO 011/79.

Para avaliação estrutural do pavimento, segundo a norma DNER-PRO 011/79, não se têm um critério universal aceito ou normas rígidas que possibilitem definir com precisão a aplicação dos critérios deflectométricos e de resistência. Mediante o problema a norma propõe um critério para fixar diretrizes na avaliação baseado na formulação em casos típicos de situações ocorridas em trechos homogêneos e que consideram parâmetros de estudos como: N (número de tráfego), D_p (deflexão de projeto), R (raio de curvatura), D_{adm} (deflexão admissível) e IGG (Índice de Gravidade Global). Segundo Bernucci et al. (2022) o Raio de curvatura é o arco de parábola que passa por dois pontos da deformada, geralmente sob a carga (d_0) e a 25cm (d_{25}) do centro. Através da Equação 14 obtém-se o raio em metros a partir das deflexões em centésimos de milímetro.

$$R = \frac{6250}{2(d_0 - d_{25})} \quad (14)$$

sendo:

d_0 : deflexão máxima;

d_{25} : deflexão a 25cm da deflexão máxima.

Na Tabela 15, tem-se os critérios de avaliação estrutural baseados nos parâmetros acima citados.

Tabela 15. Critérios para avaliação estrutural.

Hipótese	Dados Deflectométricos	Qualidade Estrutural
I	$D_p \leq D_{adm}$ $R \geq 100$	BOA
II	$D_p > D_{adm}$ $R \geq 100$	Se $D_p \leq 3 D_{adm}$ REGULAR
		Se $D_p > 3 D_{adm}$ MÁ
III	$D_p \leq D_{adm}$ $R < 100$	REGULAR PARA MÁ
IV	$D_p > D_{adm}$ $R < 100$	MÁ
V	-	MÁ O pavimento apresenta deformações permanentes e rupturas plásticas generalizadas (IGG > 180)

Fonte: DNER-PRO 011/79.

4.7.5 Divisão de Segmentos Homogêneos

Um segmento homogêneo é um trecho de pavimento que apresenta semelhanças entre características funcionais, estruturais e de tráfego. Uma forma de definir os segmentos homogêneos de um determinado pavimento é, através de planilhas eletrônicas, inserir dados de levantamento de campo (deflexões, características funcionais, espessuras de camadas, dados geotécnicos, entre outros), afim de verificar graficamente as alterações existentes ao longo do trecho observado (Balbo, 2007). Conforme recomenda o manual do DNIT (IPR – 719/2006), a definição dos segmentos homogêneos pode ser realizada de forma subjetiva, de modo que os segmentos não ultrapassem 5km e que não ocorra excesso de subdivisões, tendo em vista as limitações construtivas.

Para a divisão em segmentos homogêneos do trecho a partir de levantamentos defletométricos pode-se utilizar a metodologia descrita no apêndice ‘J’ do guia da AASHTO – 1993 (American Association of State Highway and Transportation Officials), baseada no Método das Diferenças Acumuladas (Analysis Unit Delineation by Cumulative Differences).

Em resumo Bernucci et al. (2022) sequencia as etapas de cálculos do método por meio das seguintes etapas: (1) cálculo do valor médio da deflexão do trecho - \bar{D}_i ; (2) cálculo

da diferença entre cada valor de deflexão e a deflexão média; (3) cálculo dos valores acumulados das diferenças; (4) plotagem de gráfico distâncias x valores acumulados das diferenças. As equações a seguir demonstram analiticamente o processo do método:

$$\text{Deflexão média} \quad \bar{D}_i = \frac{D(i-1) + \bar{D}_i}{2} \quad (15)$$

$$\text{Área entre estações e curva} \quad A_i = D_i \times \Delta l_i \quad (16)$$

$$\text{Área acumulada} \quad A_c = \sum A_i \quad (17)$$

$$\text{Distância acumulada} \quad L_c = \sum \Delta l_i \quad (18)$$

$$\text{Diferença acumulada} \quad Z_i = \sum A_i - t g \alpha \sum A_i \quad \text{onde: } t g \alpha = \frac{A_c}{L_c} \quad (19)$$

sendo:

D_i : deflexão na estaca i ;

Δl_i : distância entre estações.

A partir da plotagem do gráfico que compreende nas abscissas as distâncias e nas ordenadas os valores acumulados das diferenças (Figura 20), é possível definir a divisão dos segmentos a partir dos pontos de inflexão da curva, ou seja, pontos onde a função muda de concavidade.

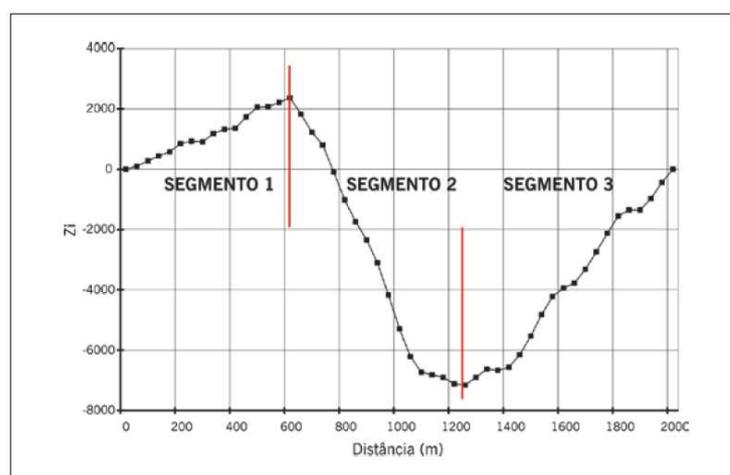


Figura 20. Exemplo gráfico da divisão dos segmentos homogêneos pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO (1993). Fonte: Bernucci et al. (2022).

4.8 Análise Fatorial

Foi realizado a análise fatorial (AF) com o objetivo de diminuir uma grande quantidade de variáveis observadas em um número menor de fatores, gerando fatores subjacentes não observados (Pereira et al., 2019). Os fatores, combinações lineares das variáveis originais, representam as dimensões latentes que resumem o conjunto original de variáveis e que mantêm a representatividade das características das mesmas (Matos & Rodrigues, 2019). A Equação 20 foi utilizada como base para cálculo da composição do modelo de análise fatorial.

$$X_i = a_i F + \varepsilon_i \quad (20)$$

sendo:

X_i : variável analisada padronizada (média zero e desvio padrão);

a_i : é uma constante (carga fatorial);

F: Fator (com média zero e desvio-padrão) comum a todas as variáveis e;

ε_i : erro (que é específico de cada variável).

De acordo com Cruz et al. (2018), para realizar a AF, é preciso analisar o grau de relacionamento entre as variáveis, dessa forma foi calculada a matriz de correlações, que possibilita identificar subconjuntos de variáveis muito correlacionadas entre si. A matriz de correlação, apresenta diagonal principal igual a 1 (simétrica), tem os valores dos elementos limitados entre -1 e 1 , sendo seu uso muito importante nos casos em que as variáveis têm valores numéricos muito diferentes (Nascimento & Guardani, 2007). Por meio do coeficiente de Spearman foi possível realizar o cálculo da matriz de correlação (Equação 21).

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{(n^3 - n)} \quad (21)$$

sendo:

d_i é a diferença entre cada posição de x e y .

Para verificar a adequabilidade da amostra foi utilizado o critério KMO (Kaiser-Meyer-Olkin), que representa a proporção da variância das variáveis que pode ser explicada pelos fatores. Sua medida varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais adequados os dados estão para se ajustar uma AF (Matos & Rodrigues, 2019). Utilizando a estatística do teste KMO (Equação 22) estimou-se o grau das correlações simples com as correlações parciais.

$$KMO = \frac{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2}{\sum_{i \neq j} \sum r_{ij}^2 + \sum_{i \neq j} \sum a_{ij}^2} \quad (22)$$

sendo:

r_{ij}^2 : para todo $i \neq j$ é o coeficiente de correlação original entre variáveis e ;

a_{ij}^2 : é o quadrado dos elementos fora da diagonal da matriz anti-imagem da correlação e este corresponde ao coeficiente de correlação parcial.

A partir daí foi aplicada a rotação de fatores ou rotação fatorial, conceito esse, utilizado dentro da AF, que consiste no giro do eixo dos fatores para que eles alcancem uma posição que possibilite a interpretação da matriz fatorial de forma mais simples. A rotação confere soluções mais claras e significativas pois simplifica a estrutura fatorial e torna mais fácil a interpretação dos fatores. Dentre os vários tipos de rotação, foi utilizado a rotação ortogonal pelo critério Varimax, que por sua vez minimiza o número de variáveis relacionadas a cada fator e simplifica a interpretação da matriz fatorial, aprimorando a distribuição da variância entre os fatores (Nakamura et al., 2010).

Para a análise a partir dos mapas foi necessário normalizar os valores dos scores fatoriais após a rotação. De acordo com Almeida (2013) o procedimento de normalização transforma a escala de classificação, geralmente usando o intervalo (0, 1), onde o elemento menos favorito tem valor 0 e o elemento mais favorito tem valor 1. Um dos procedimentos utilizados para padronização é apresentado na Equação 23.

$$v'_j(a_i) = \frac{v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)}{\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)} \quad (23)$$

sendo:

$v'_j(a_i)$: valor padronizado;

$v_j(a_i)$: valor da variável;

Min $v_j(a_i)$: valor mínimo da variável;

Max $v_j(a_i)$: valor máximo da variável;

Os valores de $v'_j(a_i)$, obtidos no intervalo $0 \leq v'_j(a_i) \leq 1$, pode ser interpretado como sendo um percentual da faixa de variação $\text{Max } v_j(a_i) - \text{Min } v_j(a_i)$ e o zero significa apenas o valor mínimo. Santos et al. (2021), define que o cálculo do score normalizado é feito a partir da Equação 24 quando a relação é positiva e da Equação 25 quando a relação é negativa.

$$FP_{ij} = \frac{F_i - F_{\min}}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (24)$$

$$FP_{ij} = \frac{F_{\max} - F_i}{F_{\max} - F_{\min}} \quad (25)$$

sendo:

FP_{ij} : score padronizado;

F_i : valor do score;

F_{\min} : representa os valores mínimos observados para os escores fatoriais;

F_{\max} : representa os valores máximos observados para os escores fatoriais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Geomorfologia

Tendo em vista que a geomorfologia compreende as dinâmicas correspondentes ao relevo terrestre e as suas formas no que se diz respeito à gênese, materiais predominantes e os processos atuantes sob dada porção da superfície do planeta, ao estudar esses componentes do espaço geográfico, é possível levantar e constatar espaços vulneráveis de acordo com diferentes objetos de estudo. Para estudos de Vulnerabilidade Ambiental, por exemplo, visa-se estudar as constantes alterações nos processos morfogenéticos e morfodinâmicos do relevo, principalmente pelas diferentes formas, tempos e intensidades no uso e apropriação do relevo (Manoel, 2018). A partir da espacialização das informações referentes ao tema de geomorfologia, foi possível confeccionar o mapa da Figura 21 que tem a distribuição das ocorrências geomorfológicas da área estudada como proposto na metodologia.

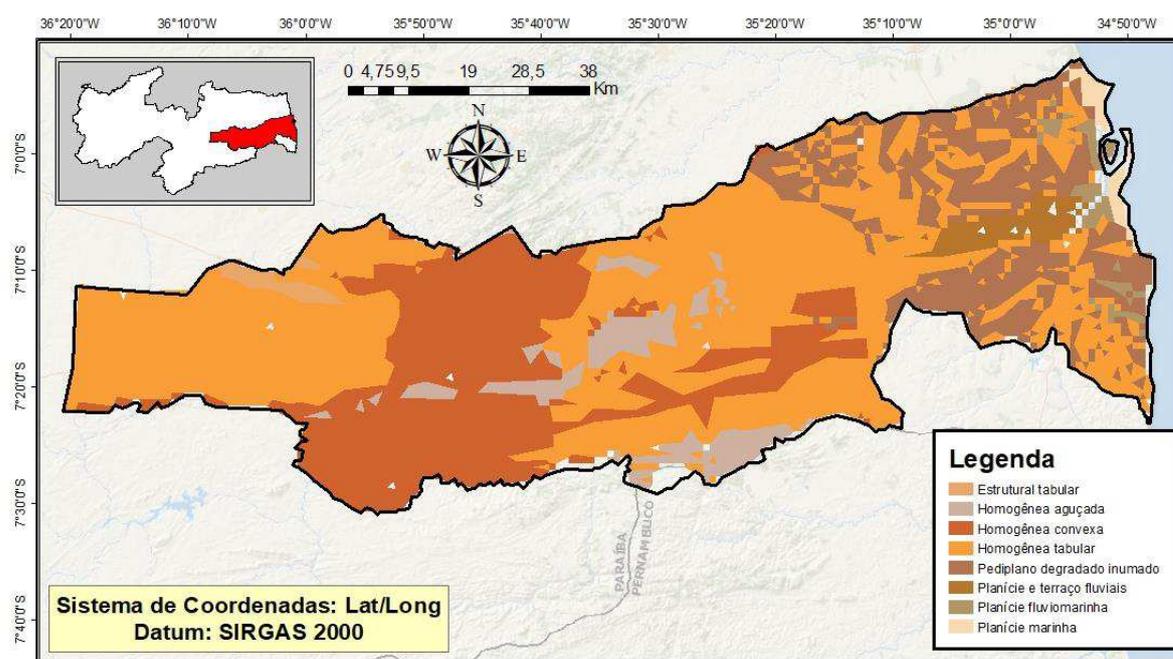


Figura 21. Mapa das ocorrências geomorfológicas. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

Observando em ordem decrescente, a porcentagem da distribuição territorial espacial de cada classe geomorfológica presente na área de estudo, Tabela 16, a maior ocorrência geomorfológica observada na área de estudo foi a Homogênea Tabular (50,28%), compreendendo mais da metade da área espacialmente classificada e presente principalmente nas porções central e ocidental da região. Esse tipo de dissecação gera formas de relevo de topos tabulares, conformando feições de rampas suavemente inclinadas

e lombas esculpidas em coberturas sedimentares inconsolidadas, denotando eventual controle estrutural (EMBRAPA, 2005).

Tabela 16. Distribuição percentual para o tema geomorfologia.

Classe Geomorfológica	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Homogênea Tabular	2501,35	50,28%
Homogênea Convexa	1246,45	25,05%
Pediplano Degradado Inumado	693,02	13,93%
Homogênea Aguçada	248,12	4,99%
Planície e Terraços Fluviais	100,14	2,01%
Planície Fluviomarina	65,39	1,31%
Estrutural Tabular	43,71	0,88%
Planície Marinha	42,47	0,85%

Fonte: Autor, 2021.

Em seguida é possível verificar a presença da classe geomorfológica Homogênea Convexa (25,05%), presente principalmente na microrregião de Campina Grande. Esse tipo de dissecação gera formas de relevo de topos convexos, às vezes denotando controle estrutural, definidas por vales pouco profundos, vertentes de declividade suave, entalhadas por sulcos e canais de primeira ordem (EMBRAPA, 2005).

As classes Tabular, Conexa e Aguçada são feições de topo características do Planalto da Borborema, que por sua vez compreende principalmente as microrregiões de Campina Grande e Itabaiana, apresentando relevos mais acidentados. A dissecação Homogênea Aguçada trata-se de um conjunto de formas de relevo de topos estreitos e alongados, esculpidas em sedimentos, denotando controle estrutural, definidas por vales encaixados (EMBRAPA, 2005).

O Pediplano Degradado Inumado compreende 13,93% do total da área espacialmente classificada e assim como as classes de Planície e Terraços Fluviais (2,01%), Planície Fluviomarina (1,31%) e Planície Marinha (0,85%), Tabela 16, apresentam topografia plana a suavemente inclinada, influência de águas marinhas e/ou dos rios e estão todos espacialmente localizadas principalmente na parte oriental da área de estudo, ou seja, na mesorregião da Mata Paraibana.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada ocorrência geomorfológica presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 22 com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável (valor 1,0), média/intermediária (valor 2,0) e alta/instável (valor 3,0).

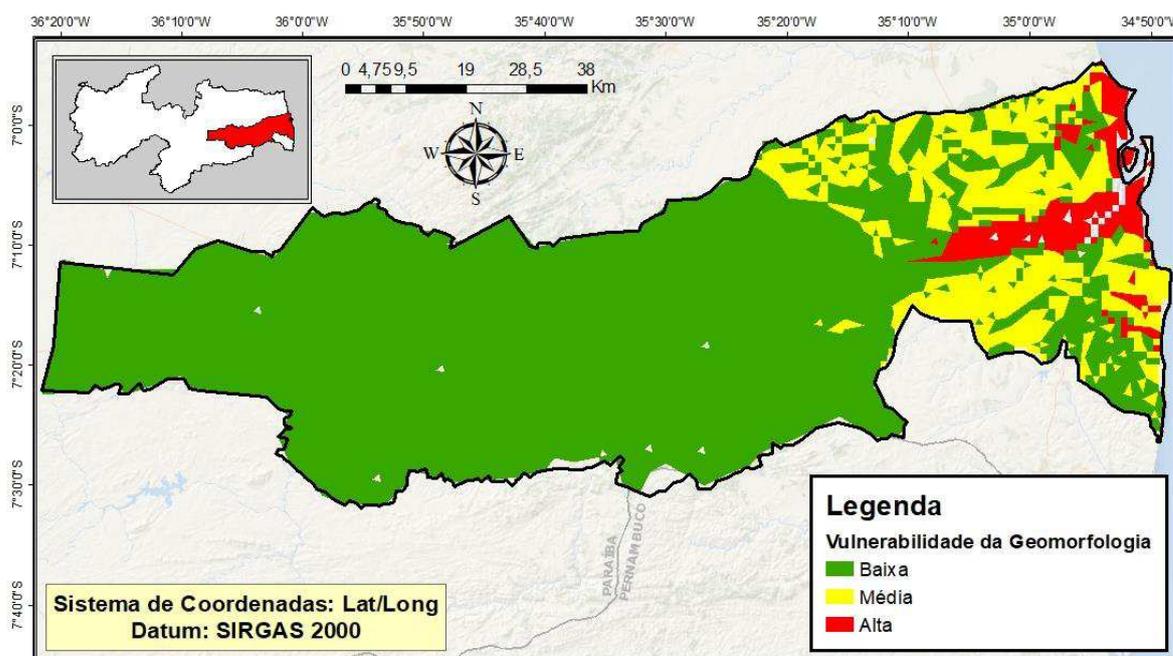


Figura 22. Mapa de vulnerabilidade da geomorfologia. Fonte: próprio Autor.

De acordo com a Tabela 17 foi possível verificar a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade geomorfológica presente na área de estudo. A área de estudo tem 85,33% da área total com baixa vulnerabilidade, basicamente a totalidade das microrregiões de Campina Grande, Itabaiana e Sapé, e parte da microrregião de João Pessoa, que pertencem a todo Agreste e parte da Mata Paraibana da região estudada. Essa área de estabilidade é composta pelas unidades geomorfológicas: Homogênea Convexa, Homogênea Aguçada, Homogênea Tabular e Estrutural Tabular. As áreas de médio risco (14,67%) são referentes as ocorrências de Pediplano Degradado Inundado e as de alta vulnerabilidade (4,47%) são compostas por Planície e Terraços Fluviais, Planície Fluviomarinha e Planície Marinha, todas na porção oriental da área de estudo, caracterizadas pelas particularidades que constituem as regiões litorâneas.

Tabela 17. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema geomorfologia.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0	5305,75	85,33%
Média (intermediária)	2,0	912,054	14,67%
Alta (instável)	3,0	277,797	4,47%

Fonte: Autor, 2021.

No contexto dos pavimentos, as ocorrências geomorfológicas que apresentam declividades mais acentuadas são importantes no escoamento da água, ajudando a drenagem superficial e evitando a saturação das camadas do pavimento. Já as ocorrências geomorfológicas de baixa declividade, dificultam a drenagem superficial, estabelecendo maior tempo de contato da água com as camadas do pavimento e provavelmente potencializam a degradação do mesmo. Segundo Medeiros et al. (2020) a geomorfologia indica regiões em que ocorrem escoamento concentrado de águas ou erosões lineares, pois descreve a topografia local, dessa forma é possível ter ideia da declividade, que por sua vez é fator preponderante no entendimento das formas do relevo de uma área submetida a movimentos de massa e fluidos.

5.2 Geologia

A Geologia considera os materiais constituintes da terra, sua estrutura, feições superficiais, processos e aparências envolvidas no arranjo, além da idade e vida no passado geológico (Silva & Crispim, 2019). As informações relativas à história da evolução geológica do ambiente onde a unidade se encontra e o conhecimento relativo ao grau de coesão das rochas de composição (intensidade da ligação entre os minerais ou partículas), compreendem a contribuição da Geologia para a análise e definição da categoria morfodinâmica da unidade de paisagem natural (Crepani et al., 2001). A partir da espacialização das informações referentes ao tema Geologia, foi possível confeccionar o mapa da Figura 23 que contém a distribuição das diferentes composições de ocorrências geológicas da área estudada como proposto na metodologia.

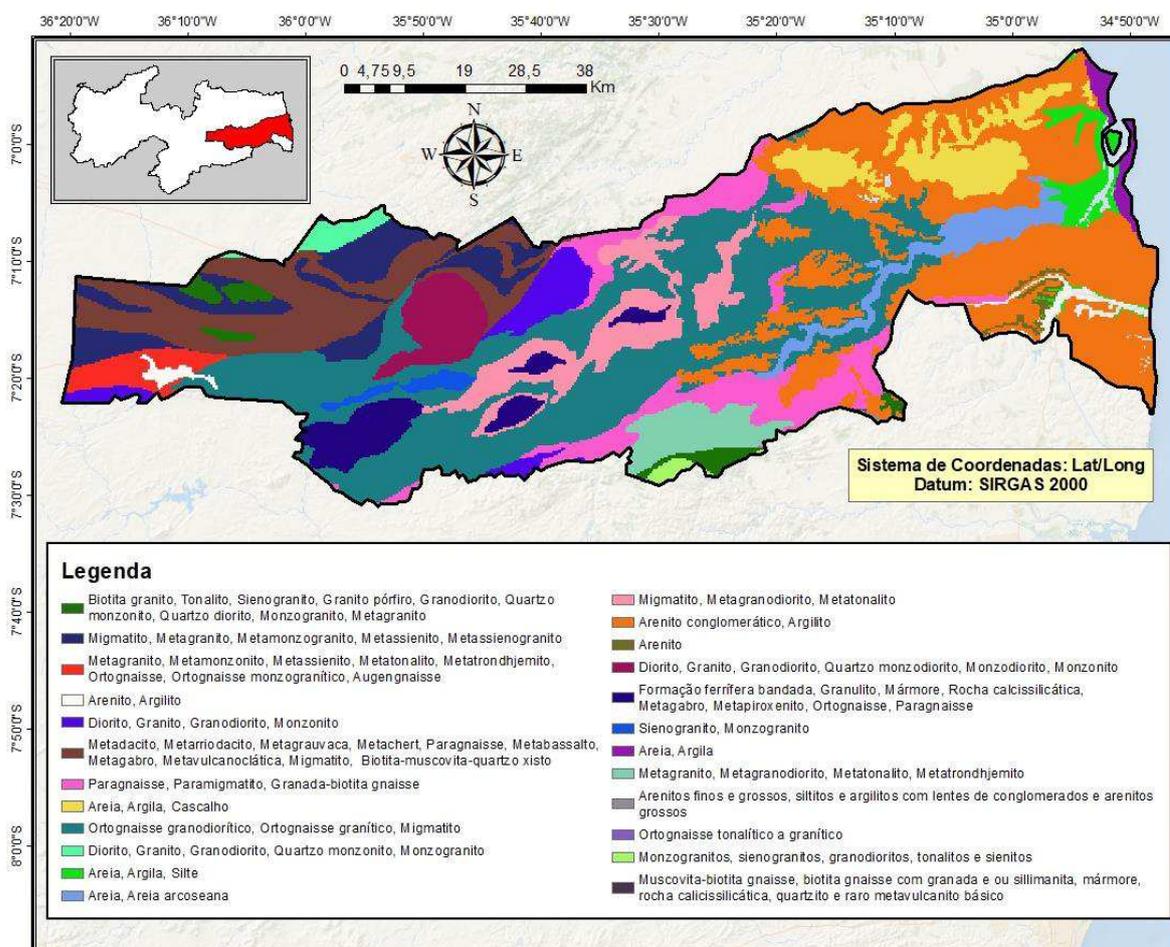


Figura 23. Mapa das ocorrências geológicas. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 18 contém, em ordem decrescente, a porcentagem da distribuição territorial espacial das diferentes composições geológicas presente na área de estudo. Afim de facilitar o entendimento e as discussões sobre o tema, a Tabela 19 tem, em ordem decrescente, a porcentagem do domínio geológico presente na área de estudo. O maior domínio geológico observado na área de estudo foi do Ortognaisse (24,26%), presente predominantemente no centro da área de estudo, abrangendo o Agreste e a Mata Paraibana. Nesse domínio predomina composições de granodiorítica e gnaisse ortoderivado, podem conter porções migmatíticas, apresenta-se pouco a intensamente fraturado com distribuição irregular, deformação dúctil/rúptil, anisotrópico, predominantemente argilo-síltico-arenoso, baixa porosidade (0 a 15%), com relevo dominado por colinas amplas e suaves, declividade de 3° a 10° e amplitude de 20 a 50 metros.

Segundo Lages et al. (2009), esse domínio presente no Complexo Cabaceiras, engloba um conjunto de ortognaisses variavelmente migmatizados com frequente intercalações de rochas metamórficas, apresentam semelhanças petrográficas e geoquímicas com gnaisses de idade paleoproterozóica do embasamento do domínio central da Província Borborema

notadamente ao Complexo Floresta. Um grupo tem composição variada de diorítica a granodiorítica/monzogranítica, contendo biotita gnaisses migmatizados com termos estromáticos, surreíticos e leucossomas (granada)-quartzo-feldspáticos. Outro grupo possui composição granítica/sienogranítica, rico em anfibólio com esparsos leucossomas compostos de quartzo, feldspato e anfibólio idiomórfico.

Tabela 18. Distribuição percentual para o tema geologia.

Classe Geológica	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Ortognaise granodiorítico, Ortognaise granítico, Migmatito	1227,53	24,26%
Arenito conglomerático, Argilito	1082,99	21,40%
Metadacito, Metarriodacito, Metagrauvaca, Metachert, Paragnaisse, Metabassalto, Metagabro, Metavulcanoclática, Migmatito, Biotita-muscovita-quartzo xisto	444,08	8,78%
Paragnaisse, Paramigmatito, Granada-biotita gnaisse	353,73	6,99%
Migmatito, Metagranito, Metamonzogranito, Metassienito, Metassienogranito	287,46	5,68%
Migmatito, Metagranodiorito, Metatonalito	273,65	5,41%
Areia, Argila, Cascalho	226,63	4,48%
Formação ferrífera bandada, Granulito, Mármore, Rocha calcissilicática, Metagabro, Metapiroxenito, Ortognaise, Paragnaisse	150,99	2,98%
Diorito, Granito, Granodiorito, Quartzo monzodiorito, Monzodiorito, Monzonito	134,66	2,66%
Areia, Areia arcoseana	132,49	2,62%
Metagranito, Metagranodiorito, Metatonalito, Metatrondhjemito	127,62	2,52%
Diorito, Granito, Granodiorito, Monzonito	122,87	2,43%
Biotita granito, Tonalito, Sienogranito, Granito pórfiro, Granodiorito, Quartzo monzonito, Quartzo diorito, Monzogranito, Metagranito	89,02	1,76%
Monzogranitos, sienogranitos, granodioritos, tonalitos e sienitos predominantemente inequigranulares finos a médios e, localmente, exibem foliação magmática. Natureza química indiscriminada	89,02	1,76%
Areia, Argila, Silte	82,98	1,64%
Metagranito, Metamonzonito, Metassienito, Metatonalito, Metatrondhjemito, Ortognaise, Ortognaise monzogranítico, Augengnaise	77,98	1,54%
Diorito, Granito, Granodiorito, Quartzo monzonito, Monzogranito	43,56	0,86%
Areia, Argila	39,33	0,78%
Sienogranito, Monzogranito	33,09	0,65%
Arenito	21,74	0,43%
Arenito, Argilito	17,19	0,34%
Arenitos finos e grossos, siltitos e argilitos com lentes de conglomerados e arenitos grossos	1,47	0,03%
Muscovita-biotita gnaisse, biotita gnaisse com granada e ou sillimanita, mármore, rocha calcissilicática, quartzito e raro metavulcanito básico	0,39	0,01%
Ortognaise tonalítico a granítico	0,19	0,004%

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 19. Distribuição percentual do domínio geológico.

Classe Geológica	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Ortognaisse	1227,72	24,26%
Arenito	1123,39	22,20%
Migmatito	561,11	11,09%
Areia	481,43	9,51%
Metadacito	444,08	8,78%
Paragnaisse	353,73	6,99%
Diorito	301,09	5,95%
Metagranito	205,60	4,06%
Formação ferrífera bandada	150,99	2,98%
Biotita	89,02	1,76%
Monzogranitos	89,02	1,76%
Sienogranito	33,09	0,65%
Muscovita	0,39	0,01%

Fonte: Autor, 2021.

Em seguida é possível verificar a presença de Arenito (22,20%), Tabela 19, principalmente na porção oriental da área estudada, compreendendo boa parte da Mata Paraibana. Nesse domínio predomina os sedimentos cenozóicos pouco a moderadamente consolidados associados a tabuleiros, apresenta alternância irregular entre camadas de sedimentos de composição diversa (Arenito, siltito, argilito e cascalho), pouco a moderadamente fraturada (distribuição irregular), deformação rúptil, anisotrópico, estratificada, alta porosidade (>30%), granular, em relevo de tabuleiros dissecados, declividade de 0° a 3° e amplitude de 20 a 50 metros. O domínio de Arenito compõe a unidade Formação Barreiras, sedimentos areno-argilosos mal consolidados, provenientes basicamente dos produtos resultantes da ação do intemperismo sobre o embasamento cristalino pré-cambriano e as rochas sedimentares do Grupo Paraíba da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba (Furrier et al., 2006).

Os domínios de Migmatitos (11,09%) e Metadacitos (8,78%), Tabela 19, afloram na porção superior ocidental da área de estudo, na mesorregião do Agreste. O Metadacito tem domínio das sequências vulcanossedimentares proterozóicas dobradas metamorfizadas de baixo a alto grau, já os Migmatitos apresentam domínio dos complexos gnissemigmatíticos granulitos. Os dois domínios apresentam características semelhantes como intensamente fraturada (distribuição irregular), deformação rúptil/dúctil, anisotrópico, de aspecto gnáissica, de textura predominantemente argilo-síltico-arenoso, baixa porosidade (0 a 15%), com relevo de planalto, declividade de 0° a 5° e amplitude de 20 a 50 metros. Os Metadacitos pertencem ao Complexo São Caetano que por sua vez é formado principalmente por biotita gnaisses de granulação fina a média, foliação e lineação de

estiramento bem marcada, e mineralogicamente constituídos por quartzo (40-50%), feldspatos (10-20%), biotita (20-30%), muscovita e minerais opacos (Freitas et al., 2018). Os Migmatitos compõem a geologia do Planalto da Borborema na unidade Recanto/Riacho do Forno.

O domínio de Areia (9,51%), Tabela 19, presente na porção oriental da área de estudo compoendo as unidades de Depósitos aluvionares, colúvio-eluviais, flúvio-marinhos e litorâneos, contém, em alguns casos, composições de argila e silte. São de domínio dos sedimentos cenozóicos inconsolidados e eólicos, de ambientes de planícies aluvionares, colúvio e tálus, ambientes mistos marinho/continental e dunas móveis, de alta porosidade (>30%), granular, em relevos de tabuleiros e planícies (fluviais, flúvio-lacustre, flúvio-marinhas e costeiras), declividade de 0° a 5° e amplitude que variam de 0 a 50 metros. Os Depósitos litorâneos praias localizam-se nas praias e regiões dos cordões litorâneos e são constituídos por coberturas quartzosas com granulação variando de areia muito fina a grânulos, com predominância da areia fina. Já os Depósitos aluvionares, localizados junto a áreas alagadas com bastante junco, estão constituídos de argilas siltico-arenosas às vezes ricas em matéria orgânica (Programa Geologia do Brasil, 2014).

O domínio de Paragnaisse (6,99%), Tabela 19, presente da porção superior e inferior central da área de estudo, compõe a unidade do complexo Sertânia, sequência metassedimentar com pequena contribuição metavulcânica, de facies anfibolitoalto, formado por gnaisses e migmatitos deprotólito essencialmente sedimentar pelítico, que ocorre no Terreno Alto Moxotó, Zona Transversal da Província Borborema (Santos et al., 2004). Esse domínio é de sequências sedimentares proterozoicas incluindo as coberturas plataformais, dobradas, metamorfizadas em baixo a alto grau, predomínio de metassedimentos siltico-argilosos, representados por xistos, com intercalações de metassedimentos arenosos, metacalcários e calssilicáticas, intensamente fraturada (distribuição irregular), deformação rúptil/dúctil, anisotrópico, com aspecto xistosa/maciça, textura predominantemente argilo-siltico-arenoso, baixa porosidade (0 a 15%), declividade de 0° a 35° e amplitude de 20 a 200 metros.

O domínio de Diorito (5,95%), Tabela 19, constituídas de Granito e Granodiorito, compõe as unidades de Plúton Aroeiras, Plúton Campina Grande, Plúton Esperança (Puxinanã) e Plúton Serra Redonda, presentes principalmente na microrregião de Campina Grande. Essa forma geológica é de domínio dos complexos granitóides, pouco a moderadamente fraturada (distribuição irregular), deformação rúptil/dúctil, duras, textura predominantemente argilo-siltico-arenoso, baixa porosidade, em relevo montanhoso, de morros, colinas, planaltos e chapadas, com declividade de 0° a 45° e amplitudes de 0 a 500

metros.

Em menor ocorrência encontram-se: Metagranito, Formação ferrífera bandada, Biotita, Monzogranitos, Sienogranito e Muscovita, Tabela 19. Em geral, o conhecimento abrangente das informações do tema para atualização do cenário geológico local, é favorecido pela espacialização da área de estudo.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada ocorrência de composição geológica presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 24 com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável, média/intermediária e alta/instável.

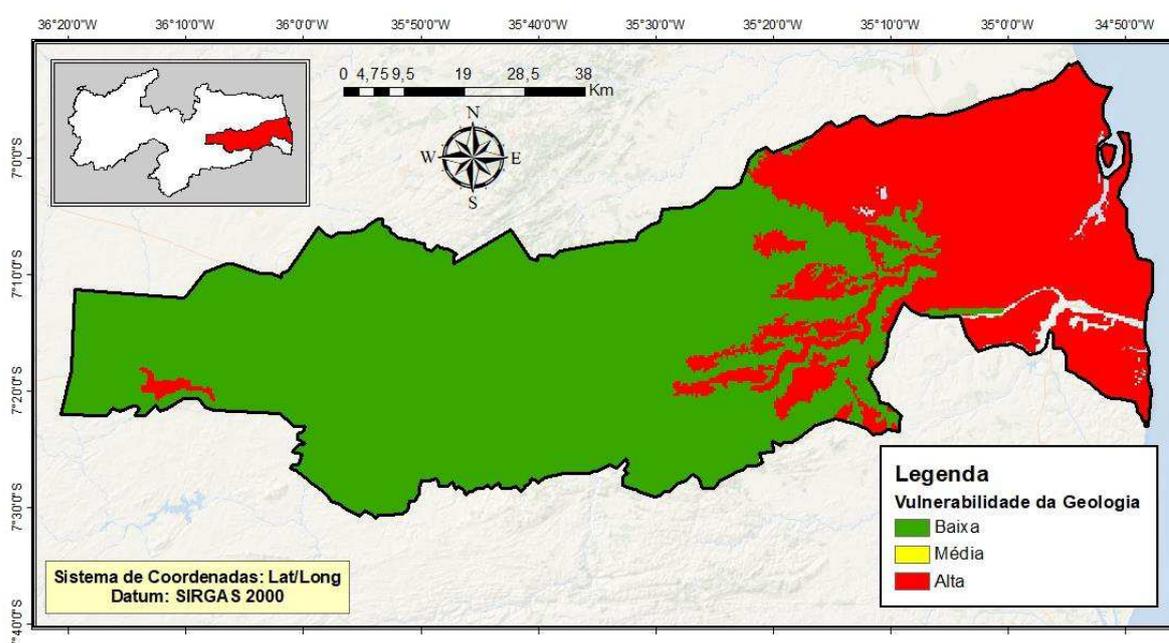


Figura 24. Mapa de vulnerabilidade da geologia. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 20 contém a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de Vulnerabilidade geológica presente na área de estudo. As composições geológicas dos domínios de Biotita, Metagranito, Sienogranito, Ortognaisse, Monzogranito, Diorito, Formação ferrífera bandada, Migmatito, Metadacito e Paragnaisse, são consideráveis, segundo as considerações metodológicas, de Baixa vulnerabilidade (estáveis), compreendendo 67,71% da área de estudo e presentes predominantemente na região de Agreste. Esta baixa vulnerabilidade deve-se a uma maior coesão das rochas de composição que por sua vez são pouco susceptíveis as intempéries. A composição geológica do domínio de Muscovita, apenas 0,01%, compõe a vulnerabilidade Média (intermediária), já os Arenitos e as Areias constituem, segundo as considerações metodológicas, a área de Alta vulnerabilidade (instável), compreendendo 32,28% da área de estudo e predominantemente

presente na porção oriental da região.

Tabela 20. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema geologia.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0-1,6	3366,23	67,71%
Média (intermediária)	1,6-2,3	0,38	0,01%
Alta (instável)	2,3-3,0	1604,81	32,28%

Fonte: Autor, 2021.

A decomposição da rocha está ligada a modificação provocada por agentes químicos de intempéries, já a desintegração compreende a diminuição da coesão da rocha devido a agentes físicos. No geral, a desagregação da rocha consiste no mecanismo de redução da resistência mecânica e aumento, sob ação de processos químicos e físicos, da produção de finos (Lopes, 2019a). A alta vulnerabilidade deve-se a uma menor coesão das rochas de composição que por sua vez são mais susceptíveis as intempéries e tendem a apresentar solos mais finos com características mecânicas de baixa resistência.

5.3 Uso e ocupação do solo

Para Valadares (2017) classificar uma área quanto ao uso e cobertura do solo, permite definir até que ponto as intervenções humanas podem alterar as características naturais do ambiente. Nesse sentido, para entender o gradiente de variação da vulnerabilidade ambiental em uma localidade por meio de informações de uso e cobertura do solo, significa analisar a suscetibilidade do ambiente às pressões antrópicas relacionando-se a vulnerabilidade natural a processos erosivos. Segundo Crepani et al. (2001) as atividades desenvolvidas dentro dos polígonos de intervenção antrópica, a exemplo da agricultura, a pecuária, a silvicultura, a mineração e as obras de engenharia civil, introduzem novas forças que podem alterar, em escala variável, as condições de equilíbrio do sistema representado pela unidade de paisagem natural. Valadares (2017) cita como exemplo o processo de urbanização que na retirada de cobertura vegetal, estabelecimento de edificações e impermeabilização do solo, por meio de pavimentação, podem alterar a infiltração de água no solo, proveniente de precipitação, modificando o escoamento superficial e evaporação de água do solo, o que reduz a umidade relativa do ar e altera as temperaturas da superfície do solo.

A partir da espacialização das informações referentes ao tema Uso e ocupação do Solo, foi possível confeccionar o mapa da Figura 25 que tem a distribuição das classes presentes na área estudada como proposto na metodologia.

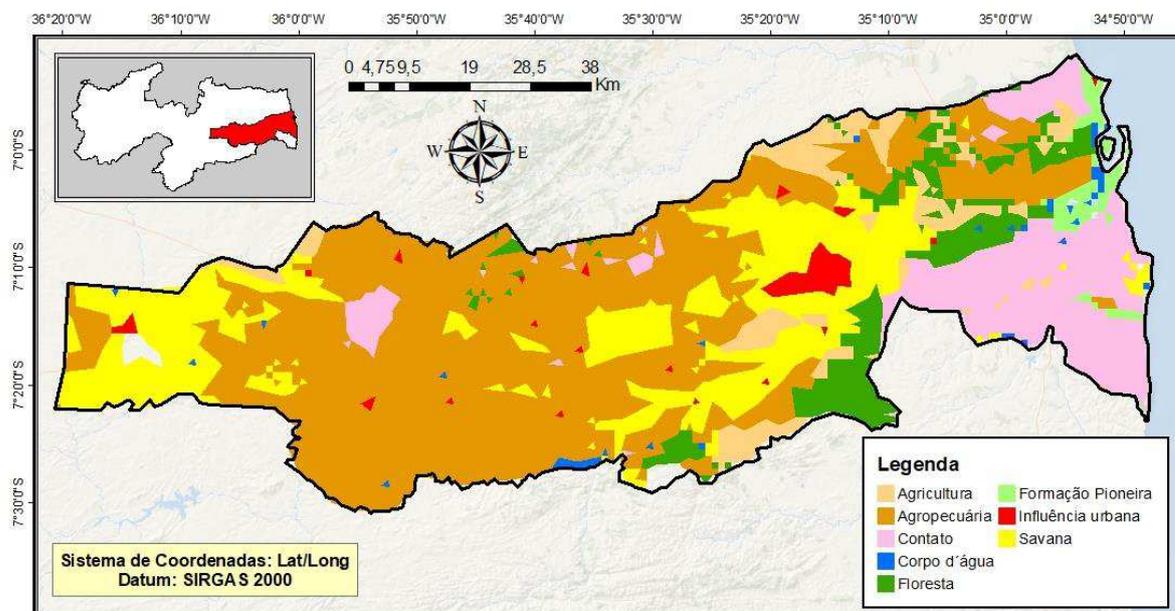


Figura 25. Mapa de Uso e Ocupação do Solo. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 21 contém, em ordem decrescente, a porcentagem da distribuição territorial espacial de cada classe para uso e ocupação do solo presente na área de estudo. A classe de maior ocorrência na área estudada foi a Agropecuária (48,59%) compreendendo as porções central e ocidental da região. Em seguida é possível verificar a presença da classe Savana (20,99%), tipo de vegetação comum em regiões semiáridas pertencentes ao bioma caatinga e fortemente influente na área estudada.

Tabela 21. Distribuição percentual para o tema uso e ocupação do solo.

Classe de Uso e Ocupação	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Agropecuária	2416,72	48,59%
Savana	1044,03	20,99%
Contato	648,79	13,04%
Floresta	350,48	7,05%
Agricultura	311,39	6,26%
Formação Pioneira	79,52	1,60%
Influência Urbana	71,02	1,43%

Fonte: Autor, 2021.

As Florestas (7,05%) estão presentes na porção oriental representativas da Mata paraibana. Em menor ocorrência encontram-se: Agricultura, Formação Pioneira e Influência Urbana, Tabela 21. Em geral, o conhecimento abrangente das informações do tema para atualização do cenário de Uso e Ocupação do Solo local, é favorecido pela espacialização da área de estudo.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada classe de Uso e Ocupação do Solo presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 26 com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável, média/intermediária e alta/instável.

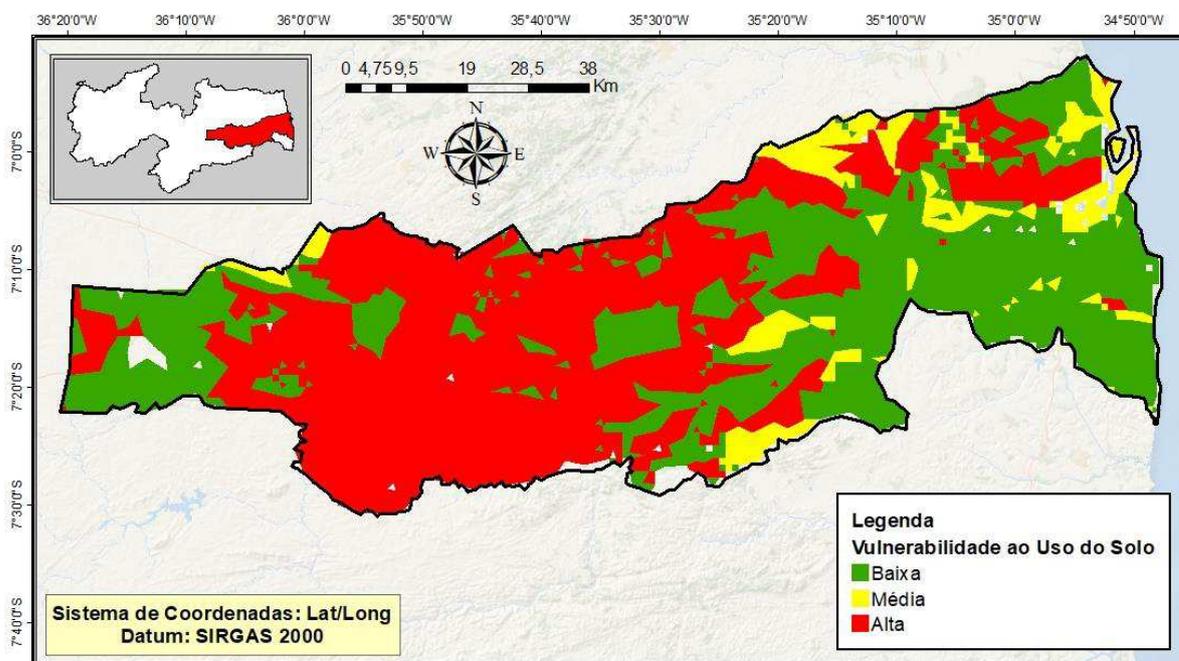


Figura 26. Mapa de vulnerabilidade para uso e ocupação do solo. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 22 contém a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade de uso e ocupação do solo presente na área de estudo. A área de estudo apresenta 41,14% da área total com baixa vulnerabilidade, essa área de estabilidade é composta, segundo as definições metodológicas, pelas classes de Floresta e Savana, que por sua vez podem apresentar cobertura vegetal que oferece proteção do solo. As áreas de médio risco (7,85%) são referentes as classes de Agricultura e Formação Pioneira e as de alta vulnerabilidade (49,97%) são compostas por Agropecuária e Influência Urbana, predominantes da porção central da área de estudo.

Tabela 22. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema uso e ocupação do solo.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0-1,6	2046,28	41,14%
Média (intermediária)	1,6-2,3	390,67	7,85%
Alta (instável)	2,3-3,0	2485,46	49,97%

Fonte: Autor, 2021.

Sambuichi et al. (2012) afirma que os impactos ambientais causados pela atividade agropecuária intensiva decorrem principalmente da degradação das áreas cultivadas, causada por práticas de manejo inadequadas e da mudança do uso do solo, resultante do desmatamento e da transformação de ecossistemas naturais em áreas cultivadas. Para Rodrigues (2001) as atividades agropecuárias ajudam no aumento das concentrações de nitrogênio e fósforo, devido, em especial, ao uso de fertilizantes empregados nas culturas que por lixiviação chegam as margens dos rios. A influência da urbanização contribui para o processo de degradação dos pavimentos quanto a presença da água, pois aumenta a sobrecarga no sistema de drenagem urbana, além do acúmulo de resíduos sólidos nos elementos do sistema de drenagem causando obstrução e possíveis enchentes em períodos chuvosos.

5.4 Drenagem

De acordo com Christofolletti (1981) a densidade de drenagem, que representa o grau de dissecação topográfica em paisagens elaboradas pela atuação fluvial, relaciona o número de rios ou canais com a área da bacia. Dessa forma é uma das variáveis mais importantes para a análise morfométrica das bacias hidrográficas. Para Santana (2003), como a água é essencial nas ações químicas e biológicas do processo de intemperização facilitando o processo erosivo, a influência no desenvolvimento do perfil é provocada pelo conteúdo de umidade retido pelo material do solo. Ainda, indiretamente, essa umidade promove variações de temperatura, de precipitação, drenagem, entre outros aspectos, provocando a diferenciação entre terrenos declivosos e planos.

Nos pavimentos, a função da drenagem de uma rodovia é eliminar a água que, sob qualquer forma, atinge o corpo estradal, captando-a e conduzindo-a para locais em que menos afete a segurança e durabilidade da via (DNIT, IPR – 724/2006). De acordo com Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos (DNIT, IPR – 720/2006) os métodos de dimensionamento presumem que será promovida uma drenagem adequada e as considerações referentes à topografia da região, ou as restrições impostas pelas estruturas contíguas devem ser analisadas.

A partir da espacialização das informações referentes ao tema Drenagem, foi possível confeccionar o mapa da Figura 27 tem a distribuição da drenagem da área estudada como proposto na metodologia.

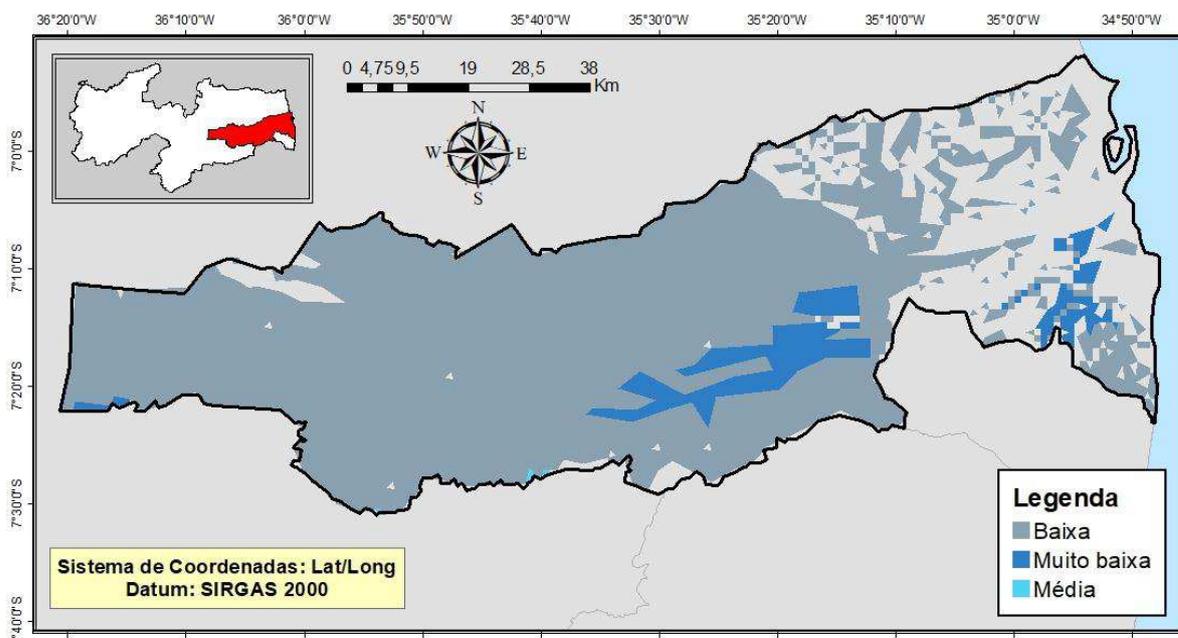


Figura 27. Mapa de drenagem. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 23 tem, em ordem decrescente, a porcentagem da distribuição territorial espacial de cada classe de drenagem presente na área de estudo. A densidade de Drenagem do tipo Baixa (74,38%), corresponde a maior área observada na região de estudo, compreendendo mais da metade da área espacialmente classificada e presente principalmente nas porções central e ocidental da região.

Brubacher et al. (2011) afirmam que em sub-bacias com substrato rochoso mais permeável, a capacidade de formação de canais é reduzida, diminuindo a densidade de drenagem. Em contrapartida, quanto maior a densidade de drenagem, maior é a velocidade com que a água atinge o rio, incrementando o efeito de enchentes a jusante da sub-bacia. A área de estudo ainda apresenta, em baixa proporção, classes de densidade de drenagem Muito Baixa (5,74%) e Média (0,07%).

Tabela 23. Distribuição percentual para o tema drenagem.

Classe de Drenagem	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa	3704,49	74,38%
Muito Baixa	285,89	5,74%
Média	3,39	0,07%

Fonte: Autor, 2021.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada ocorrência de densidade de drenagem presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 28 com a escala de vulnerabilidade:

baixa/estável, média/intermediária e alta/instável.

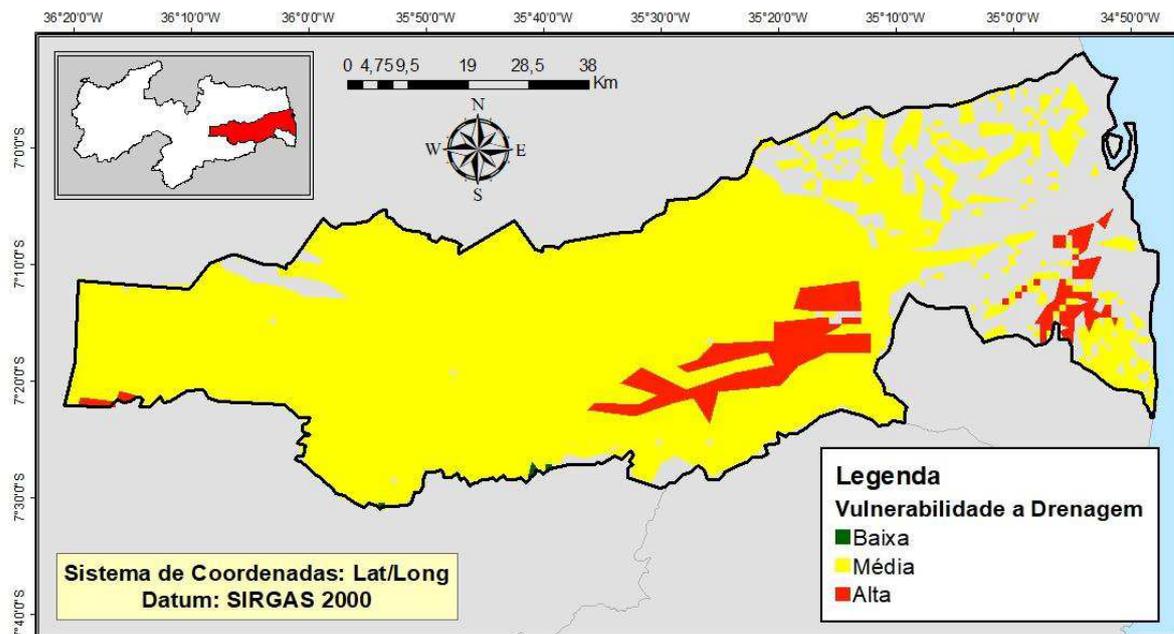


Figura 28. Mapa de vulnerabilidade da drenagem. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 24 tem a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade a drenagem presente na área de estudo. A área de estudo contém 74,38% da área total com Média vulnerabilidade, composta pela classe de Densidade de Drenagem Baixa. As áreas de baixo risco (0,07%) são referentes a classe de Densidade de Drenagem Média e as de Alta vulnerabilidade (5,74%) são compostas pela classe de Densidade de Drenagem Muito Baixa.

Tabela 24. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o tema drenagem.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0	3,39	0,07%
Média (intermediária)	2,0	3704,49	74,38%
Alta (instável)	3,0	285,89	5,74%

Fonte: Autor, 2021.

A porosidade e a permeabilidade do solo e da rocha definem a intensidade de dissecação do relevo pela drenagem, ou seja, rochas e solos impermeáveis dificultam a infiltração das águas, apresentando maior quantidade de água em superfície. Isso implica em um número maior de canais de drenagem, maior disponibilidade de energia potencial para o escoamento superficial (Crepani et al., 2001). Quanto menor a declividade, maior será a profundidade do solo, ou seja, em regiões mais planas, com baixo potencial de drenagem, maior será a permanência de água e conseqüentemente a ação do intemperismo provocará a

presença de solos mais finos, que por sua vez, geralmente, apresentam baixa capacidade de suporte. As regiões de topografia acentuada, apesar de apresentarem fenômenos intensos de erosão provocados pela velocidade de escoamento da água principalmente em áreas desprotegidas, apresentam maior potencial de drenagem, que por sua vez facilitam a retirada da água da região pavimentada tornando-se menos danoso ao pavimento.

5.5 Modelo digital de elevação do terreno

De acordo com Câmara et al. (2001) os modelos digitais são utilizados por uma série de procedimentos de análises úteis para aplicações de geoprocessamento permitindo visualizar modelos em projeção geométrica planar, gerar imagens temáticas em escalas variadas de cores, calcular volumes de corte e aterro, realizar análises de perfis, gerar variados mapas a exemplo de mapas de declividade, drenagem e curva de nível. Além disso, esses produtos, integrados a outros tipos de dados geográficos, podem ajudar no desenvolvimento de diversas aplicações como na determinação de áreas de vulnerabilidade e geração de relatórios de impacto ambiental.

Atualmente no Brasil, o modelo mais utilizado é o Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM), com resolução espacial aproximada de 90 metros disponibilizados pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), também estão disponíveis, a partir de 2015, com resolução aproximada de 30 metros. A geomorfometria emprega modelos digitais estruturados em grades, sendo as mais utilizadas as triangulares e as regulares, compostas por matrizes com valores de elevação da superfície do terreno. Os atributos topográficos representam mensurações quantitativas da superfície terrestre (Neuman et al. 2018).

A partir da espacialização das informações referentes ao MDE, foi possível confeccionar o mapa da Figura 29 que tem a distribuição das altitudes encontradas na área estudada como proposto na metodologia.

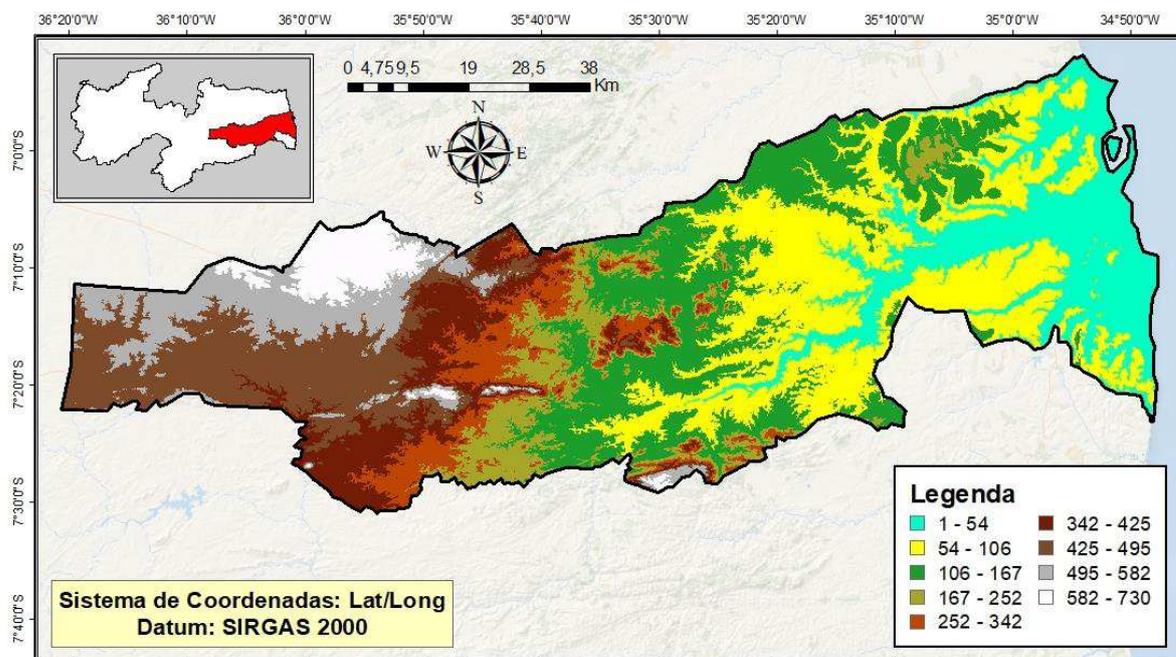


Figura 29. Distribuição espacial da altimetria na área de estudo. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 25 tem a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada classe do MDE presente na área de estudo. A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), obteve-se o resultado da espacialização do atributo altimetria, ou seja, a variação entre a altitude máxima e mínima da área de estudo, encontrando a cota mínima de 1m (Mata Paraibana) e a máxima <730m (Agreste) de acordo com a descrição algorítmica de análise do terreno realizada em ambiente SIG. A cota máxima deve-se a influência do Planalto da Borborema que por sua vez apresenta altitudes de até 730m na microrregião de Campina Grande, porção ocidental da região estudada. A medida que se aproxima do litoral, na microrregião de João Pessoa (Mata Paraibana), porção oriental da região, a declividade diminui até chegar a cota do nível do mar.

Tabela 25. Distribuição percentual para o MDE.

Classe do MDE (m)	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
1 - 54	889,32	14,45%
54 - 106	1412,02	22,94%
106 - 167	1154,96	18,76%
167 - 252	433,74	7,05%
252 - 342	368,91	5,99%
342 - 425	441,45	7,17%
425 - 495	765,02	12,43%
495 - 582	462,40	7,51%
582 - 730	227,12	3,69%

Fonte: Autor, 2021.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada classe do MDE presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 30 com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável, média/intermediária e alta/instável.

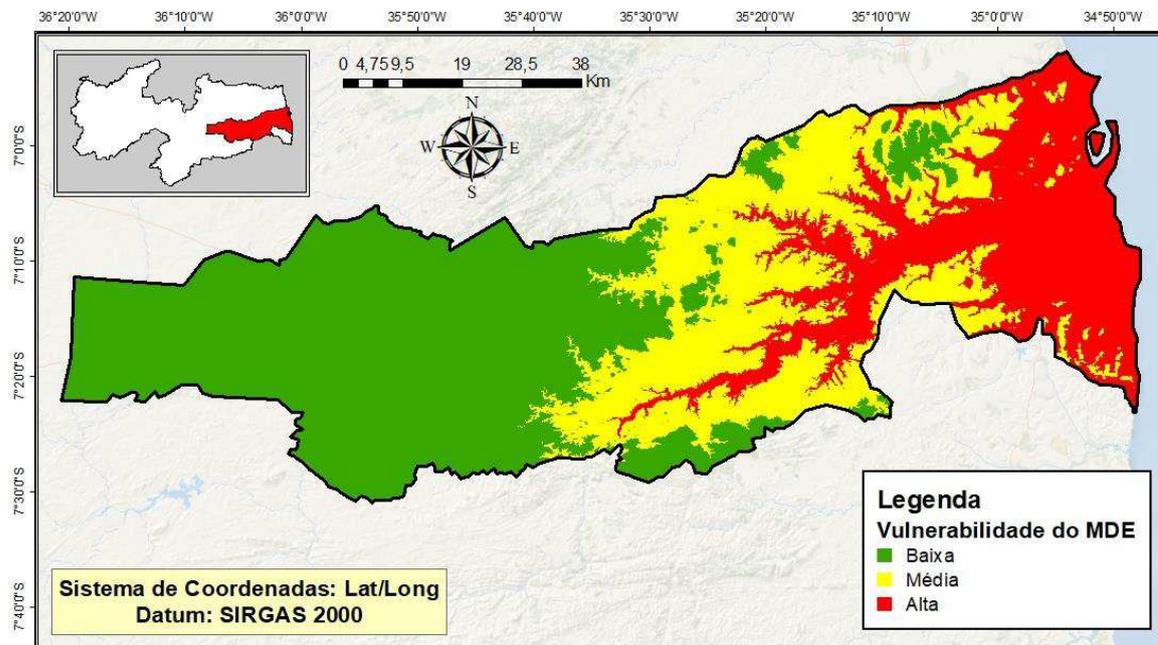


Figura 30. Mapa de vulnerabilidade do MDE. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 26 tem a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade ao MDE presente na área de estudo. A área de estudo apresenta 48,76% da área total com Baixa vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas, esse grupo é composto pelas classes de cotas acima de 141,5 metros de amplitude altimétrica. Esse comportamento é presente, principalmente na porção ocidental da área de estudo, influenciadas pelo Planalto da Borborema.

Tabela 26. Distribuição percentual da vulnerabilidade para o MDE.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0-1,6	3001,48	48,76%
Média (intermediária)	1,6-2,3	1709,84	27,78%
Alta (instável)	2,3-3,0	1443,97	23,46%

Fonte: Autor, 2021.

A estabilidade é associada a possibilidade de maiores declividades longitudinais do pavimento, que por sua vez pode gerar uma maior drenagem, evitando, assim, que a água permaneça mais tempo próxima do corpo estradal. A área de vulnerabilidade Média

(27,78%) é composta por cotas que variam de 77-141,5 metros de amplitude altimétrica e as regiões de Alta vulnerabilidade (23,46%) compreendem amplitudes altimétricas menores que 77 metros, Tabela 26. Estas regiões, por sua vez, encontram na porção litorânea da área de estudo, apresentam alta vulnerabilidade pois devida a sua baixa declividade e conseqüentemente baixo potencial de drenagem, permitem maior permanência da água no corpo estradal. Segundo Chaves (2002), o relevo é representado, no mundo digital, pelos modelos digitais de elevação, atuando como importante regulador da distribuição do fluxo de água e energia dentro das bacias hidrográficas.

5.6 Precipitação pluviométrica

A importância de se conhecer o comportamento pluviométrico em uma determinada bacia hidrográfica, sendo a chuva a mais importante forma de precipitação devido à sua capacidade de produzir escoamento, deve-se ao fato, do grau de precipitação pluviométrica estar atribuído ao potencial de perdas de solos (Cabral et al., 2005). Segundo Crepani et al. (2001) as informações que definem a intensidade pluviométrica, como a pluviosidade anual e a duração do período chuvoso, permitem a quantificação empírica do grau de risco a que está submetida uma unidade de paisagem, pois em situações de alta pluviosidade anual e curta duração do período chuvoso, podem ser traduzidas como situações onde a quantidade de água disponível para o “runoff” é muito grande, de forma inversa, a baixa pluviosidade anual distribuída em um maior período de tempo, leva a situações de menor risco para a unidade de paisagem, sendo menor a disponibilidade de água para o “runoff”.

A partir da Figura 31 é possível verificar as maiores precipitações por ano, para os 44 postos pluviométricos selecionados na área de estudo, referentes a série histórica de 25 anos. O gráfico distribui os postos de forma espacialmente estratégica no sentido do semi-árido para o litoral. Essa distribuição espacial apresenta como parâmetro o valor do Coeficiente de Pearson (r) para um ajuste polinomial de 0,89 indicando uma correlação positiva e forte, ou seja, à medida que se aproxima do litoral, maiores são os valores da precipitação máxima acumulada mensal do ano.

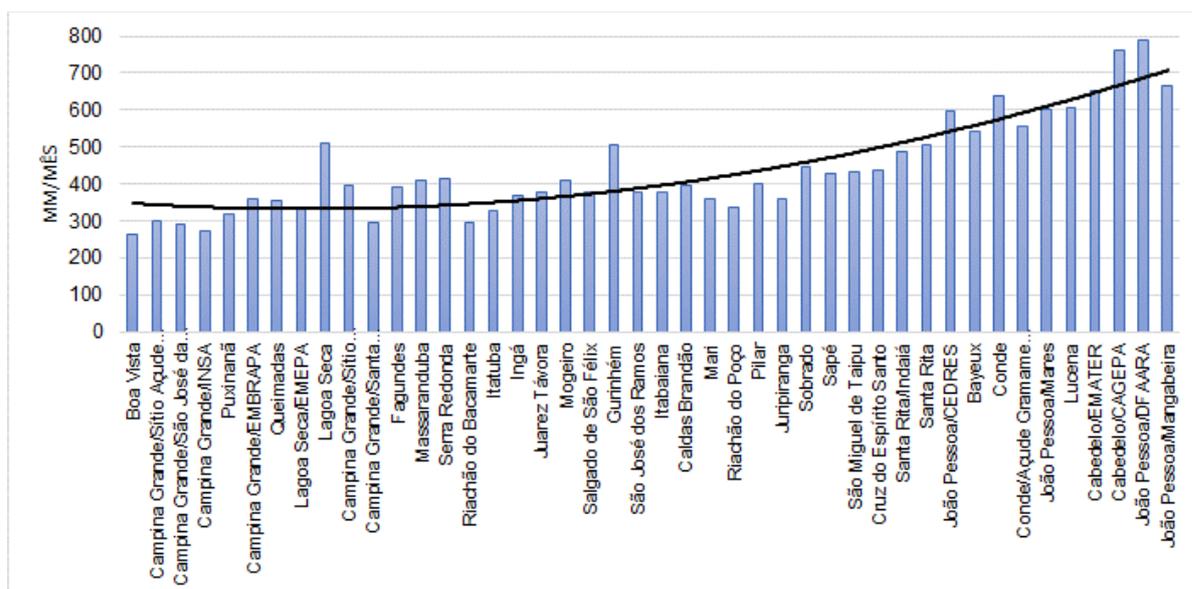


Figura 31. Variabilidade geoespacial da distribuição pluviométrica da área de estudo. Fonte: próprio Autor.

A partir das informações georreferenciadas dos postos pluviométricos, contendo o quantitativo pluviométrico de cada cidade do estado da Paraíba obtidos no Geoportal da AESA, os dados de precipitação foram integrados em ambiente SIG e com base na espacialização das informações, foi possível confeccionar o mapa da Figura 32 que tem a distribuição da pluviosidade (mm/mês) da área estudada.

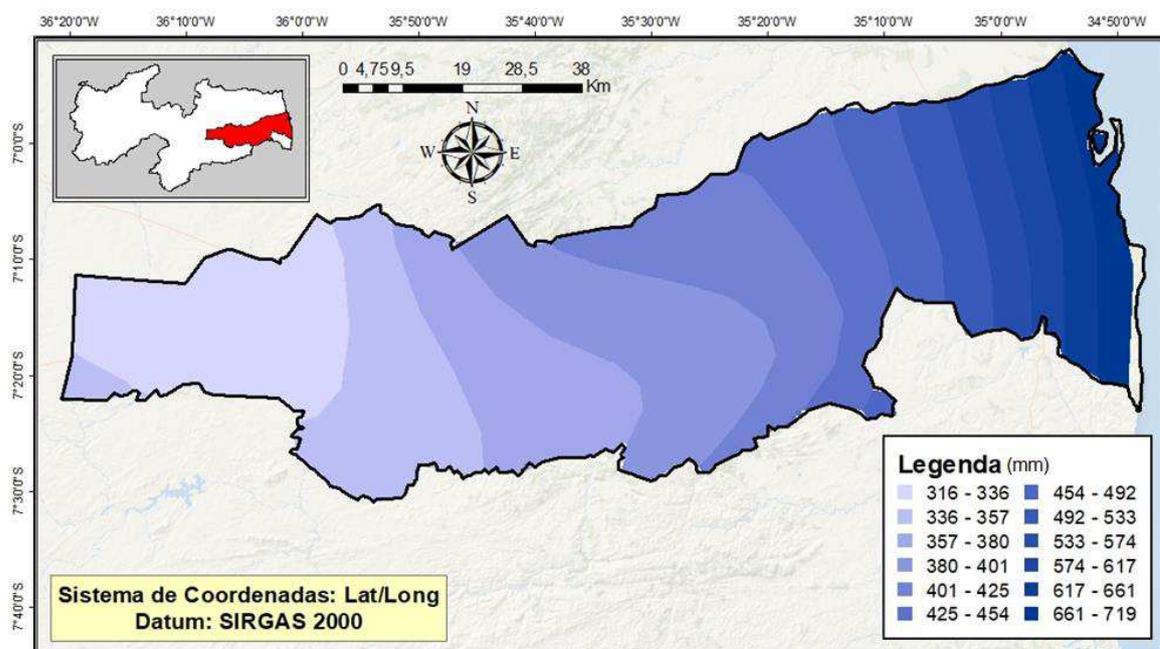


Figura 32. Mapa da composição pluviométrica. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

Como resultado, a variação pluviométrica foi de 316mm a 719mm referentes a série histórica de 25 anos (1994-2019). De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima da área de estudo é predominantemente do tipo As', quente e úmido com chuvas de outono/inverno que ocorrem desde o Litoral até o Agreste, Figura 32. É possível verificar que a distribuição pluviométrica é crescente da porção ocidental para a porção oriental da área de estudo, ou seja, à medida que se aproxima do litoral a precipitação aumenta.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada intensidade pluviométrica presente na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 33 com a escala de vulnerabilidade: média/intermediária e alta/instável.

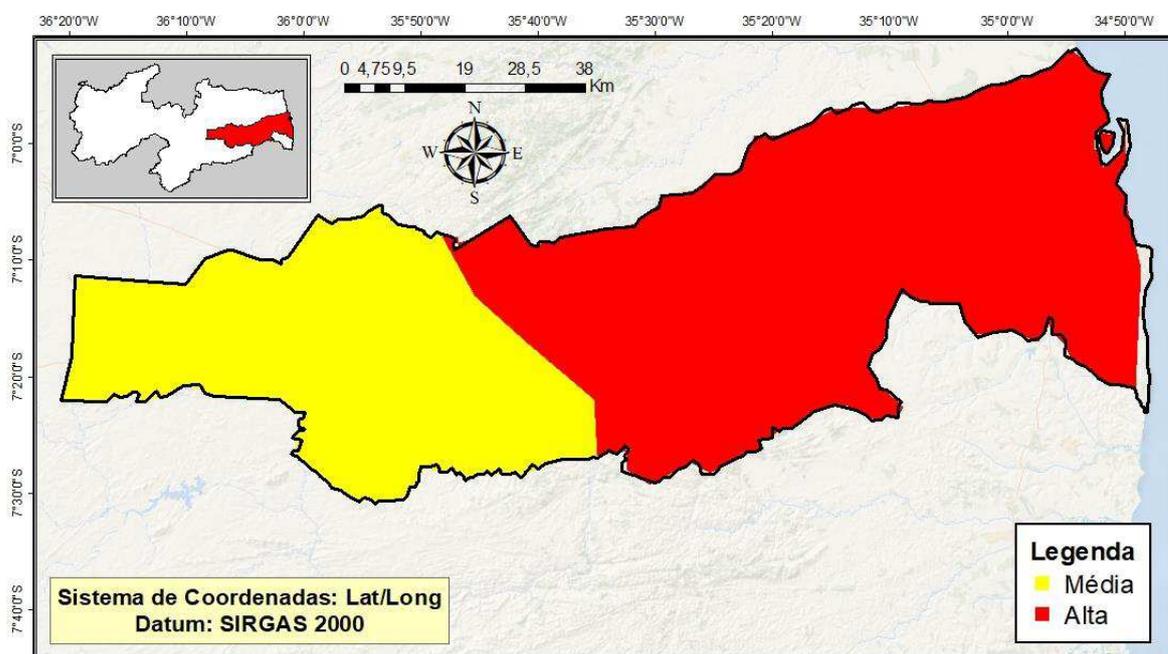


Figura 33. Mapa de vulnerabilidade da intensidade pluviométrica. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 27 contém a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada classe de vulnerabilidade da precipitação pluviométrica presente na área de estudo. A área de estudo tem 35,91% da área total com Média vulnerabilidade, esse grupo é composto, segundo as condições metodológicas, pelas classes de intensidade pluviométrica que variam de 316-375mm/mês, predominantemente na microrregião de Campina Grande (Agreste). A região de Alta vulnerabilidade (64,09%), representando mais da metade da área de estudo, apresenta intensidade pluviométrica acima de 375mm/mês englobando as microrregiões de Itabaiana, Sapé e João Pessoa, sendo esta última a região de máxima intensidade pluviométrica. Como já discutido anteriormente, a presença de água é um fator de grande

impacto na degradação do pavimento, ou seja, áreas que apresentaram maior vulnerabilidade são aquelas que apontam maior intensidade pluviométrica.

Tabela 27. Distribuição percentual da vulnerabilidade da precipitação pluviométrica.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Média (intermediária)	1,6-2,3	1795,58	35,91%
Alta (instável)	2,3-3,0	3204,76	64,09%

Fonte: Autor, 2021.

Os pavimentos possuem grandes áreas expostas às intempéries e ao tráfego. Sob ações combinadas das mudanças de temperatura e das chuvas, e ainda das tensões e deformações causadas pela solicitação do tráfego, surgem vários tipos de ações danosas que aumentam a irregularidade, desagregam o material superficial e, eventualmente, podem conduzir à ruína do pavimento. A quantidade de água que infiltra através da superfície do pavimento é função da capacidade de vazão das trincas ou juntas, da quantidade de trincas, da área que drena cada trinca ou junta e da intensidade e duração das chuvas (Pereira, 2003)

5.7 Declividade (Slope)

A declividade é responsável pela infiltração das águas das chuvas e a velocidade de escoamento das águas, tornando-se um dos principais fatores na verificação de ameaça a deslizamentos de terra. Assim, a geração do mapa de declividade para análise das formas de relevo e amplitudes altimétricas apresenta-se como importante fator para o entendimento dos processos geodinâmicos (Filho et al., 2018). A declividade ocasiona uma diferença de potencial capaz de criar fluxos de drenagem de alto poder erosivo pela transformação de energia potencial em energia cinética (Crepani et al., 2001).

A partir da espacialização das informações referentes a declividade (%), foi possível confeccionar o mapa da Figura 34 que tem a distribuição das classes de declividade encontradas na área estudada como proposto na metodologia.

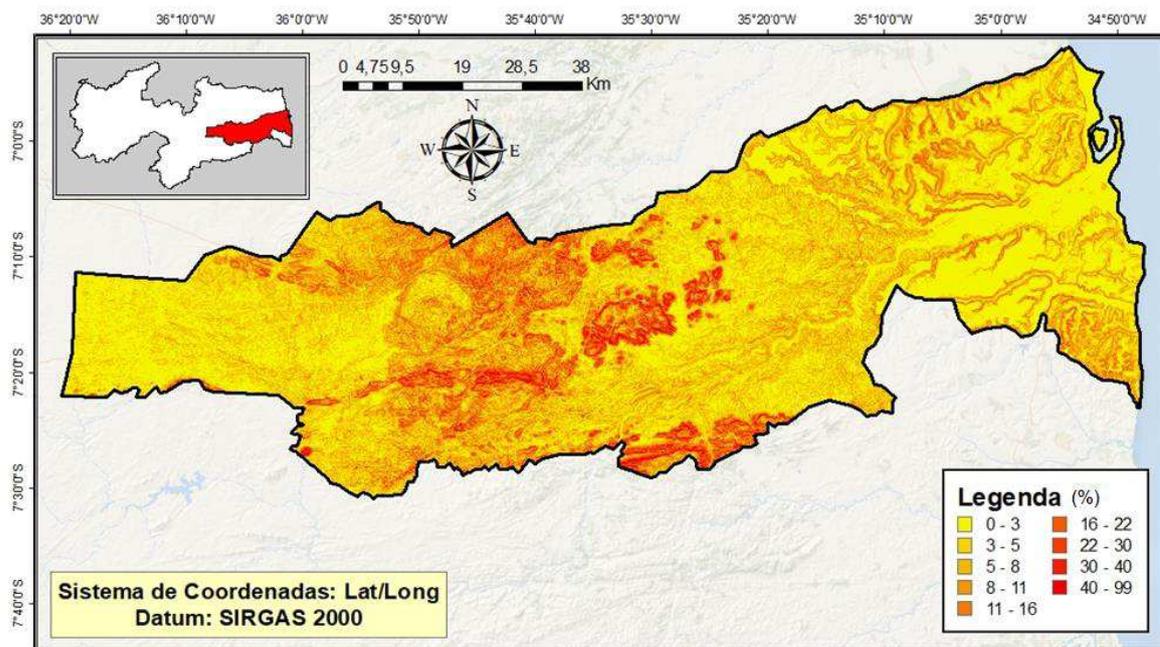


Figura 34. Mapa de declividade. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 28 contém a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada classe de declividade da área de estudo. A partir do MDE, por meio de ambiente SIG, utilizou-se a ferramenta Slope e obteve-se o mapeamento da declividade com resultado final calculado em porcentagem. A declividade da área de estudo varia de 0-99%, sendo as declividades mais acentuadas presentes na porção centro-oeste influenciada pela parte oriental do Planalto da Borborema. As baixas declividades estão presentes, principalmente, a oeste da área de estudo, próximas ao litoral.

Tabela 28. Distribuição percentual para a declividade.

Classes de Declividade	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
0 - 3	2095,14	34,04%
3 - 5	1386,69	22,53%
5 - 8	1189,97	19,33%
8 - 11	560,11	9,10%
11 - 16	452,30	7,35%
16 - 22	234,54	3,81%
22 - 30	139,54	2,27%
30 - 40	70,72	1,15%
40 - 99	26,09	0,42%

Fonte: Autor, 2021.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada classe de declividade presentes na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 35 com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável,

média/intermediária e alta/instável.

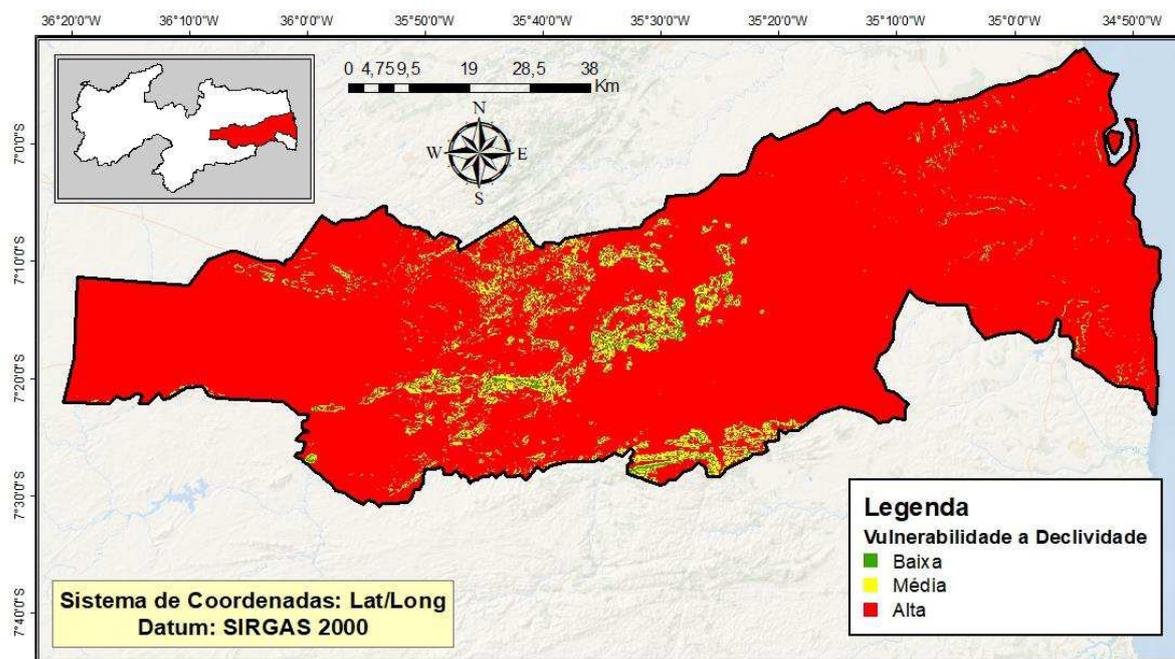


Figura 35. Mapa de vulnerabilidade a declividade. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 29 tem a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade a declividade presente na área de estudo. A área de estudo apresenta 93,53% da área total com Alta vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas esse grupo é composto pelas declividades menores que 19,8%. Para o pavimento, a declividade longitudinal é importante no escoamento da água, melhorando, assim, a drenagem superficial, ou seja, regiões de baixa declividade apresentam maior vulnerabilidade pois tendem a diminuir o escoamento podendo fazer com que a água fique por mais tempo em contato com as camadas. A área de estudo ainda apresentou 5,58% de área com Média vulnerabilidade (declividades entre 19,8%-37,2%) e apenas 0,89% com Baixa vulnerabilidade (declividades maiores que 37,2%).

Tabela 29. Distribuição percentual da vulnerabilidade para a declividade

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0-1,6	54,75	0,89%
Média (intermediária)	1,6-2,3	343,53	5,58%
Alta (instável)	2,3-3,0	5756,80	93,53%

Fonte: Autor, 2021.

Para o pavimento, a declividade longitudinal é importante no escoamento da água ajudando a drenagem superficial. Pereira (2003) ressalta que em rodovias que apresentam

greide plano ou em regiões baixas de rodovias que apresentam greide ondulado, devido à reduzida declividade longitudinal e à maior dificuldade que a água tem para escoar superficialmente, há uma propensão para ocorrência de infiltração pelas bordas do pavimento.

5.8 Pedologia

De acordo com Barbosa (2020), quanto a pedologia, deve-se considerar o solo como sendo um corpo natural e tridimensional o qual é necessário conhecer sua origem, composição, distribuição na paisagem e que fatores ambientais influenciam na sua formação. O estudo das condições do solo precisa ser feito desde as camadas mais superficiais até as mais profundas, dessa forma, o conhecimento da espacialização pedológica permite saber suas características de modo a avaliar a vulnerabilidade quanto às ações antrópicas.

A partir da espacialização das informações referentes a composição pedológica, foi possível confeccionar o mapa da Figura 36 que tem a distribuição das classes de solos encontradas na área estudada como proposto na metodologia.

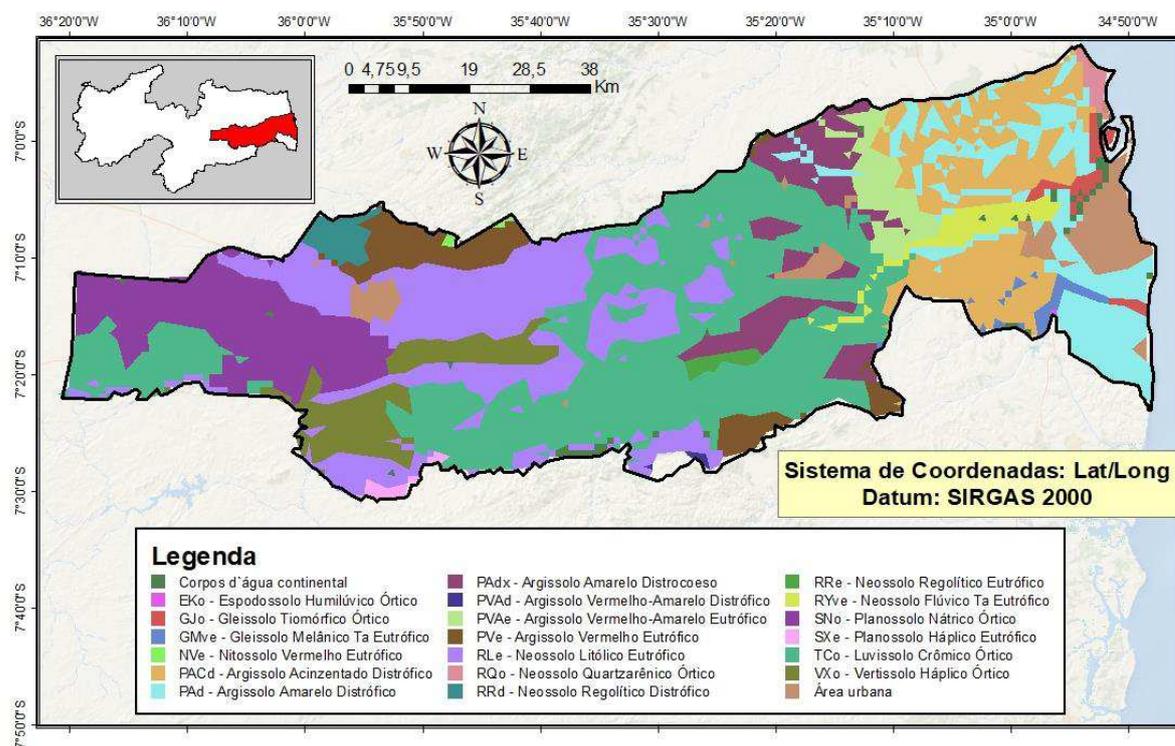


Figura 36. Mapa de composição pedológica. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 30 tem, em ordem decrescente, a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada classe de tipos de solo presente na área de estudo. Em destaque temos o tipo de solo Luvissole Crômico Órtico (TCo), presente na parte central da área de estudo,

compreende 29,08% da região, restringem-se ao Nordeste brasileiro, são solos rasos que raramente ultrapassam 1m de profundidade, presente em regiões de relevo suave ondulado e em localidades de eminente déficit hídrico, a exemplo do semiárido. O solo do tipo Neossolo Litólico Eutrófico (RLe), presente no Agreste na área de estudo, compreende 16,62% e apresentam características como pouca profundidade, presença de rocha e declives acentuados. O Argissolo Acinzentado Distrófico (9,64%) é característico do litoral da área, desenvolvem-se a partir de materiais argilosos ou areno-argilosos, característicos de áreas planas ou de relevo suave ondulado quase plano dos tabuleiros sedimentares do Grupo Barreiras. O Planossolo Nátrico Órtico (9,57%), presente principalmente a oeste da área de estudo, podem ocorrer em áreas de topografia suave, em áreas costeiras de clima seco, geralmente nos terraços de rios e riachos. Com 8,09% tem-se o Argissolo Amarelo Distrófico, presente no litoral da área de estudo, são originados, principalmente, de materiais argilosos ou areno-argilosos sedimentares da formação Barreiras na região litorânea do Brasil (EMBRAPA, 2013).

Tabela 30. Distribuição percentual para a composição pedológica.

Classes de Composição Pedológica	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
TCo - Luvisolo Crômico Órtico	1444,93	29,08%
RLe - Neossolo Litólico Eutrófico	825,91	16,62%
PACd - Argissolo Acinzentado Distrófico	479,22	9,64%
SNo - Planossolo Nátrico Órtico	475,83	9,57%
PAd - Argissolo Amarelo Distrófico	401,85	8,09%
PAdx - Argissolo Amarelo Distrocoeso	264,62	5,32%
VXo - Vertissolo Háplico Órtico	233,20	4,69%
PVe - Argissolo Vermelho Eutrófico	201,13	4,05%
Área urbana	198,67	4,00%
PVAe - Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	127,66	2,57%
RYve - Neossolo Flúvico Ta Eutrófico	82,95	1,67%
RRd - Neossolo Regolítico Distrófico	53,28	1,07%
GJo - Gleissolo Tiomórfico Órtico	42,77	0,86%
Corpos d' água continental	35,37	0,71%
GMve - Gleissolo Melânico Ta Eutrófico	32,53	0,65%
RRe - Neossolo Regolítico Eutrófico	21,68	0,44%
RQo - Neossolo Quartzarênico Órtico	19,16	0,39%
SXe - Planossolo Háplico Eutrófico	17,85	0,36%
NVe - Nitossolo Vermelho Eutrófico	5,83	0,12%
PVAd - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	4,31	0,09%
EKo - Espodossolo Humilúvico Órtico	0,83	0,02%

Fonte: Autor, 2021.

Em menor proporção encontram-se os tipos de solo: Argissolo Amarelo Distrocoeso, Vertissolo Háplico Órtico, Argissolo Vermelho Eutrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico, Neossolo Flúvico Ta Eutrófico, Neossolo Regolítico Distrófico, Gleissolo

Tiomórfico Órtico, Gleissolo Melânico Ta Eutrófico, Neossolo Regolítico Eutrófico, Neossolo Quartzarênico Órtico, Planossolo Háplico Eutrófico, Nitossolo Vermelho Eutrófico, Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico e Espodossolo Humilúvico Órtico. Em geral, o conhecimento abrangente das informações do tema para atualização do cenário pedológico local, foi favorecido pela espacialização da área de estudo.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada classe de solo presente na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 37 com a escala de vulnerabilidade: média/intermediária e alta/instável.

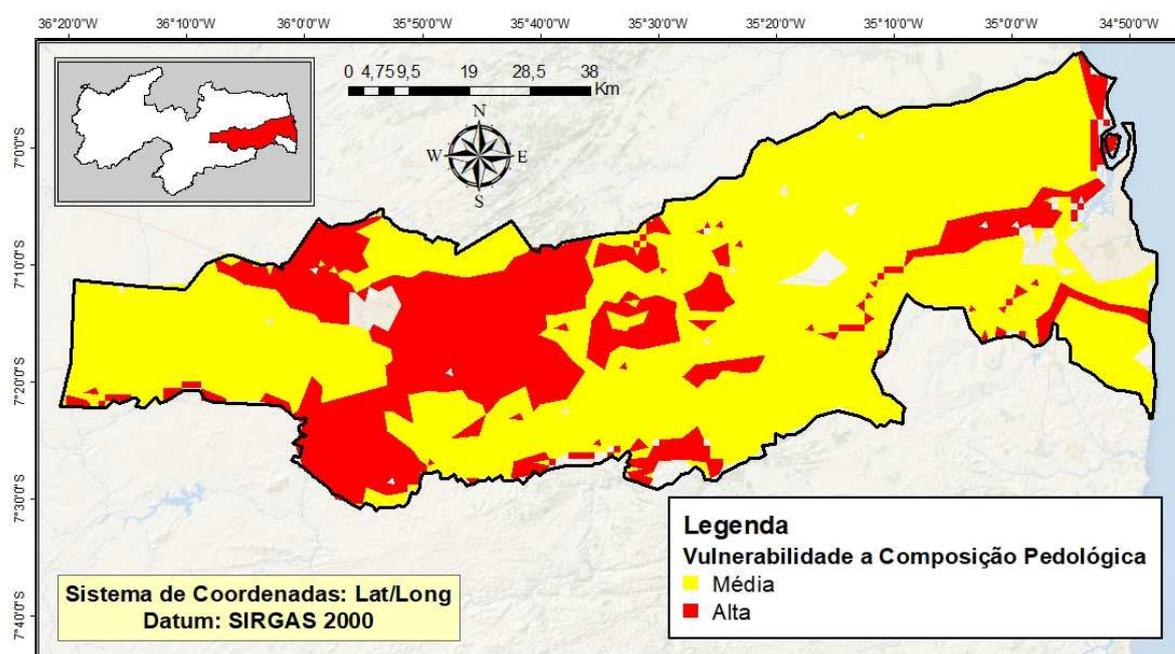


Figura 37. Mapa de vulnerabilidade a composição pedológica. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 31 contém a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade a composição pedológica presente na área de estudo. A área de estudo apresenta 68,94% da área total com Média vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas esse grupo é composto por solos do tipo: Luvisolo, Planossolo, Argissolo, Espodossolo e Nitossolo. A área apresentou, também, 26,37% com Alta vulnerabilidade (Neossolo, Vertissolo e Gleissolo). De acordo com Teixeira (2014), solos que possuem grandes quantidades de partículas finas (silte e argila) tornam-se inadequados para fins de pavimentação, isso ocorre devido às más interações entre suas partículas e a água, causando efeitos desfavoráveis como: expansão, contração, diminuição da coesão e redução da resistência quanto a solicitação de esforços.

Tabela 31. Distribuição percentual da vulnerabilidade para composição pedológica.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Média (intermediária)	2,0	3429,31	68,94%
Alta (instável)	3,0	1311,77	26,37%

Fonte: Autor, 2021.

5.9 Textura

Características como textura, estrutura, porosidade, permeabilidade, consistência e profundidade, definem a vulnerabilidade dos solos quanto a presença de água e saturação devido a variação do nível do lençol freático (Franco et al., 2015). De acordo com Brandão (2003) a textura, determinada pela quantidade de macroporos do solo, influencia a movimentação de água e interfere na infiltração, além de determinar a forma e continuidade dos poros. Solos arenosos apresentam maior quantidade de macroporos do que solos argilosos, este fator faz com que as areias apresentem, quando saturadas, maior condutividade hidráulica do que as argilas.

A partir da espacialização das informações referentes a textura do solo, foi possível confeccionar o mapa da Figura 38 que tem a distribuição das classes de textura encontradas na área estudada como proposto na metodologia.

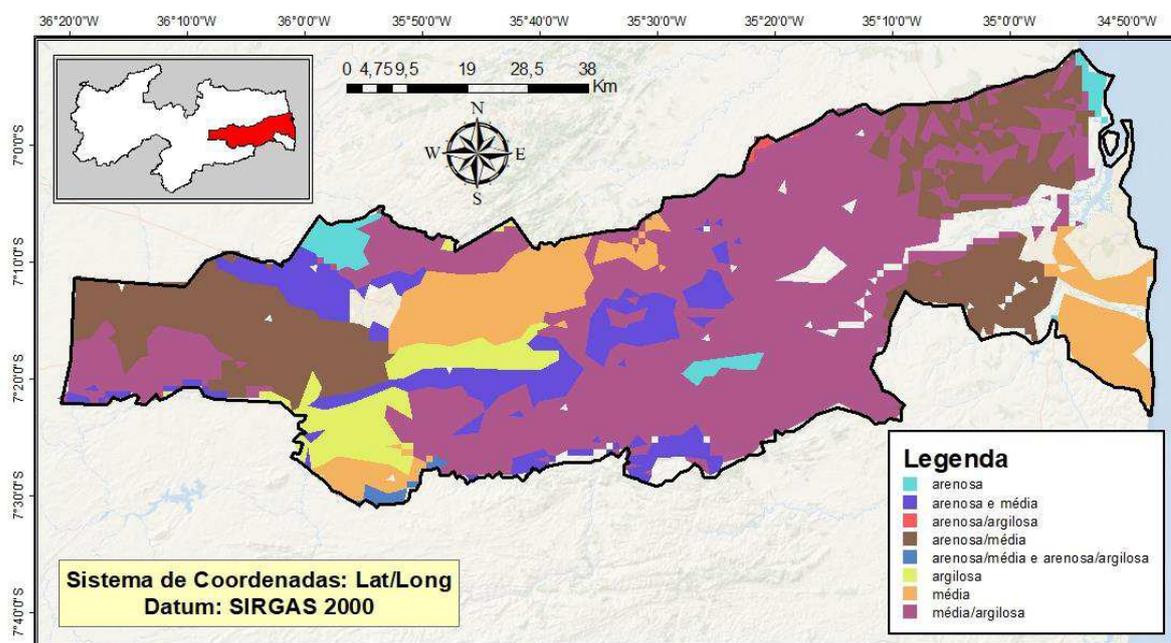


Figura 38. Mapa de textura do solo. Fonte: Adaptado IBGE (2021).

A Tabela 32 contém, em ordem decrescente, a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada classe de textura presente na área de estudo. Em destaque, a textura do tipo Média/argilosa, presente na parte central e oriental da área de estudo, compreende

45,39% da região. Solos de textura média geralmente contêm uma adequada drenagem, capacidade de retenção de água e média capacidade de erosão, além disso, apresentam equiparação entre terrores de areia, silte e argila. A parte argilosa, possivelmente predominante nessa classe, geralmente são solos com teores de argila superiores a 35%, mais coesos, de baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água. Esse tipo de solo apresenta suscetibilidade a compactação, porém é resistente a erosão (Antônio, 2016).

Tabela 32. Distribuição percentual para a textura do solo.

Classes de Textura	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Média/argilosa	2256,77	45,39%
Arenosa/média	955,00	19,21%
Média	557,72	11,22%
Arenosa e média	451,70	9,09%
Argilosa	239,02	4,81%
Arenosa	95,83	1,93%
Arenosa/média e arenosa	17,85	0,36%
Arenosa/argilosa	5,66	0,11%

Fonte: Autor, 2021.

A classe Arenosa/média (19,21%) é encontrada tanto na porção oriental quanto ocidental da área de estudo. Antônio (2016) afirma que solos arenosos possuem teores de areia superiores a 70% e de argila inferior a 15%, são permeáveis (facilitadores de infiltração), com baixa capacidade de retenção de água e altamente susceptíveis à erosão. A área de estudo apresenta, ainda, a classe de predominância Média (11,22%), Arenosa e média (9,09%) e em menor proporção as classes Argilosa, Arenosa, Arenosa/média e arenosa, além da classe Arenosa/argilosa. Em geral, o conhecimento abrangente das informações do tema para atualização da realidade dos tipos de textura local, foi favorecido pela espacialização da área de estudo.

A partir do grau de vulnerabilidade ambiental atribuído para cada classe de textura presente na área estudada, obedecendo as condições metodológicas, foi possível confeccionar o mapa da Figura 39 com a escala de vulnerabilidade: baixa/estável, média/intermediária e alta/instável.

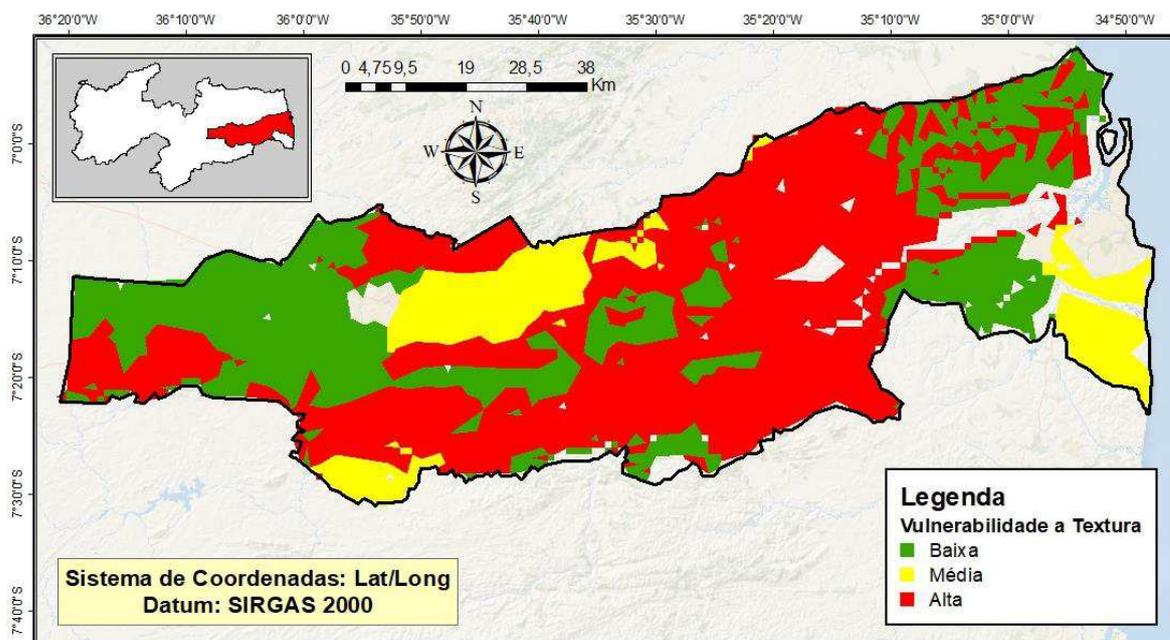


Figura 39. Mapa de vulnerabilidade a textura do solo. Fonte: próprio Autor.

A Tabela 33 tem a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível de vulnerabilidade a textura presente na área de estudo. A área de estudo apresenta 50,13% da área total com Alta vulnerabilidade, obedecendo as condições metodológicas esse grupo é composto por solos com predominância de argila na sua composição. Quanto maior a presença de partículas finas, do tipo silte e argila, maior será a vulnerabilidade deste para o pavimento, pois esse tipo de solo pode apresentar interações entre suas partículas e a água causando efeitos de expansão e contração, ocasionando na diminuição da resistência. A área apresentou, também, 30,26% com Baixa vulnerabilidade (predominância de areia) e 11,71% Média com boa representatividade do tipo de textura Média.

Tabela 33. Distribuição percentual da vulnerabilidade para textura.

Vulnerabilidade	Valor	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Baixa (estável)	1,0	1505,23	30,26%
Média (intermediária)	2,0	582,64	11,71%
Alta (instável)	3,0	2493,59	50,13%

Fonte: Autor, 2021.

5.10 Índice Vulnerabilidade de Pavimentação a partir da álgebra de mapas

O conjunto de dados (matriz composta por 71.241 pixels) referente a média de cada valor calculado por pixel, foi submetido, com nível de significância de 5%, a estimativa de quantis para divisão igualitária dos intervalos das classes de vulnerabilidade. A Tabela 34 tem a estatística descritiva dos dados.

Tabela 34. Estatística descritiva dos dados.

Variável	Observações	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
IVP	71241	1,00	2,98	2,22	0,198

Fonte: Autor, 2021.

A Tabela 35 contém os percentis utilizando a função de distribuição acumulada empírica com limites inferior e superior baseados na distribuição Normal.

Tabela 35. Tabela de percentis.

Percentil	Valor	Limite inferior	Limite superior
Máximo 100%	3,10		
99%	2,71	2,70	2,71
95%	2,57	2,57	2,58
90%	2,51	2,51	2,51
3° Quartil 75%	2,39	2,39	2,39
Mediana 50%	2,27	2,27	2,27
1° Quartil 25%	2,12	2,12	2,13
10%	1,98	1,98	1,98
5%	1,94	1,94	1,94
1%	1,66	1,60	1,68
Mínimo 0%	1,00		

Fonte: Autor, 2021.

A partir de todos os temas propostos, aplicando a sobreposição de mapas, foi gerado o mapa de vulnerabilidade geral que compõe o IVP (Figura 40), utilizando uma escala comum e pesos de vulnerabilidade para cada classe conforme as condições metodológicas, alicerçado pela calculadora de Raster que sintetiza a média das variáveis a partir da álgebra de mapas.

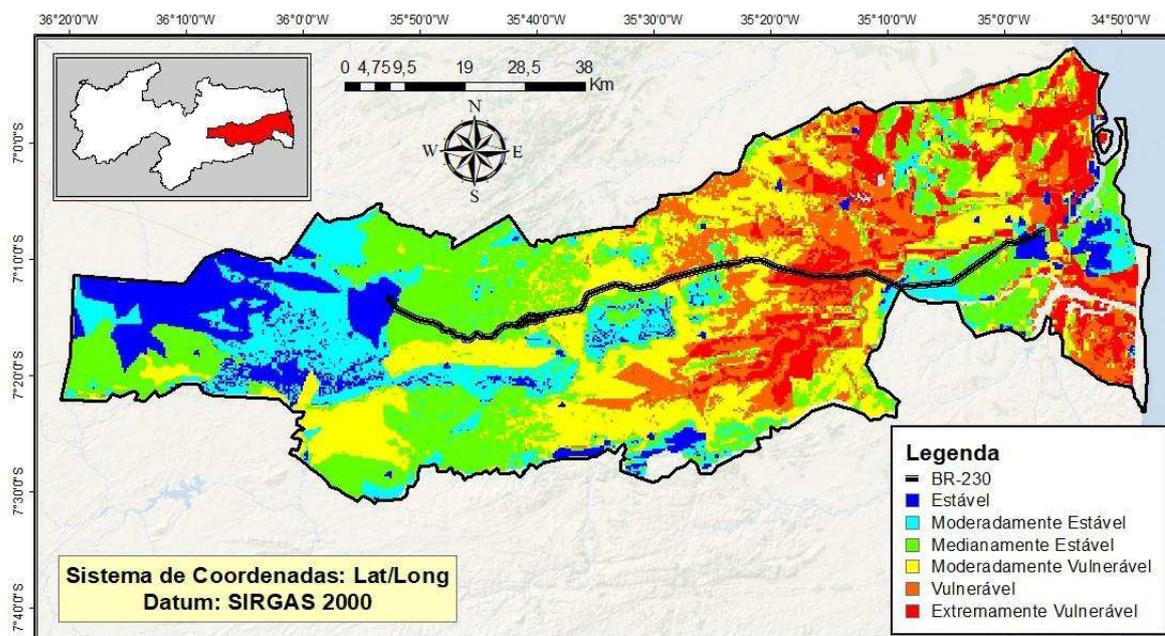


Figura 40. Mapa do Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos. Fonte: próprio Autor.

É possível observar, a partir da distribuição visual do Índice de Vulnerabilidade de Pavimentos sobre a área de estudo, que as áreas do entorno da BR-230 identificadas pela classificação de vulnerável, desde moderada a extremamente vulnerável, se encontram, em sua maioria, na extensão que vai aproximadamente da porção central da Microrregião de Itabaiana até a porção central da Microrregião de sapé. Esse trecho é identificado como a região de transição entre o Agreste e a Mata Paraibana e encontra-se aproximadamente entre o quilômetro 63 e 121 da rodovia, totalizando uma extensão de quase 60km.

A Tabela 36 tem a porcentagem da distribuição territorial espacial para cada nível do IVP presente na área de estudo.

Tabela 36. Distribuição territorial espacial dos níveis do IVP.

IVP	Intervalo	Área (Km ²)	Porcentagem (%)
Estável	1,00 – 1,98	604,15	10,28%
Moderadamente Estável	1,98 – 2,12	862,47	14,67%
Medianamente Estável	2,12 – 2,27	1510,01	25,69%
Moderadamente Vulnerável	2,27 – 2,39	1453,27	24,73%
Vulnerável	2,39 – 2,51	872,34	14,84%
Extremamente Vulnerável	2,51 – 3,00	574,98	9,78%

Fonte: Autor, 2021.

Ao verificar as combinações de classificação, a região estudada apresenta mais de 50% de áreas com algum nível de estabilidade e pouco mais de 49% de áreas com um certo risco de vulnerabilidade. Essas áreas de vulnerabilidade apresentam, em sua maioria, a

combinação de características em que predominam elementos considerados fatores que possam contribuir para a degradação do pavimento. A exemplo de composições geológicas como os arenitos e as areias, predominância de atividades ligadas a agropecuária e forte influência urbana, densidade de drenagem muito baixa, amplitudes altimétricas menores que 77m, intensidade pluvial acima de 375mm/mês, declividades menores que 19,8%, solos com textura predominantemente argilosa e com classificações do tipo Neossolo, Vertissolo e Gleissolo.

As áreas de estabilidade, predominantes na microrregião de Campina Grande e centro sul da microrregião de João Pessoa, apresentam, também, em sua maioria, a combinação de características em que predominam elementos considerados fatores que possam desfavorecer a degradação do pavimento. A exemplo de unidades geomorfológicas do tipo homogênea e tabular, composições geológicas como os ortognaisses, predominância classes de floresta e savana, cotas acima de 141,5 m de amplitude altimétrica, intensidade pluvial que varia de 316-375mm/mês, solos com textura predominantemente arenosa e com classificações do tipo Luvisolo, Planossolo, Argissolo, Espodossolo e Nitossolo.

De acordo com Siche et al. (2007) o índice, singularizado como um valor numérico, pode servir como mecanismo de tomada de decisão/previsão, pois este utiliza-se de cálculos, bases científicas e métodos adequados para representar a realidade de um sistema simples ou complexo. Para Aquino (2017) a elaboração de índices de vulnerabilidade ambiental, é retratada como complexa, tendo em vista que a completude de um ecossistema não pode ser expressa diretamente por meio de uma única medida e nem sua quantificação/qualificação podem ser resolvidas de forma geral, porém, os índices, são importantes instrumentos para auxiliar no gerenciamento da vulnerabilidade que se apresenta como uma parte delicada de qualquer estratégia de desenvolvimento sustentável.

5.11 Avaliação de Pavimentos

O trecho selecionado para a avaliação estrutural e funcional do pavimento compreende parte da rodovia federal transversal BR-230, Rodovia Transamazônica, que faz a ligação entre a cidade de Campina Grande e a capital João Pessoa no estado da Paraíba. O segmento corresponde a uma via duplicada e estende-se do Km 36 ao km 148 totalizando 112km de extensão.

Para avaliação do pavimento em questão foram utilizados dados da rodovia referentes ao Levantamento Deflectométrico obtido através do equipamento Falling Weight Deflectometer – FWD (DNER-PRO 273/96) realizado em abril de 2021 e o Levantamento Visual Contínuo – LVC (DNIT 008/2003 – PRO) realizado em dezembro de 2021. Todas as

informações foram provenientes do banco de dados do Sistema de Gerência de Pavimentos – SGP cedidos pela Superintendência Regional do DNIT (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes) no estado da Paraíba.

A divisão em segmentos homogêneos foi definida por meio do Método das Diferenças Acumuladas, procedimento indicado pela AASHTO (1993), que por sua vez faz uso da deflexão D_0 . O gráfico da Figura 41 contém nas abscissas a extensão em km do trecho (x10) e nas ordenadas os valores acumulados das diferenças (x0,01mm). No gráfico é possível verificar a divisão dos segmentos a partir dos pontos de inflexão da curva gerada.

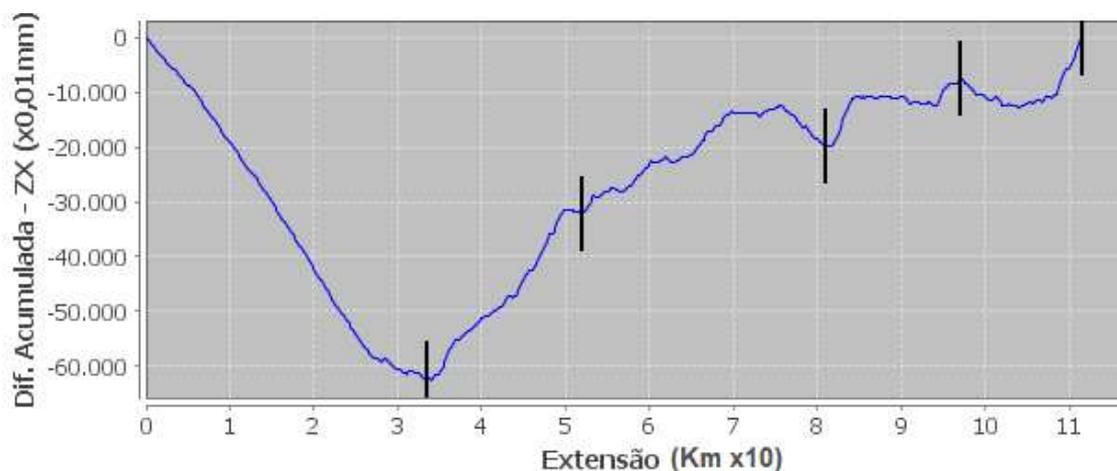


Figura 41. Divisão dos segmentos homogêneos do trecho da área de estudo pelo método das diferenças acumuladas da AASHTO (1993). Fonte: próprio Autor.

Dessa forma a Tabela 37 tem os segmentos homogêneos adotados, bem como a extensão de cada um.

Tabela 37. Classificação de irregularidade superficial

Segmentos Homogêneos (SH)	Extensão (km)
SH 1	33,20
SH 2	18,40
SH 3	29,00
SH 4	16,20
SH 5	14,40

Fonte: próprio Autor.

Para melhor visualização espacial dos segmentos no trecho da área de estudo, a Figura 42 tem o mapa contendo as subdivisões bem como a localização e o sentido de cada segmento no trecho.

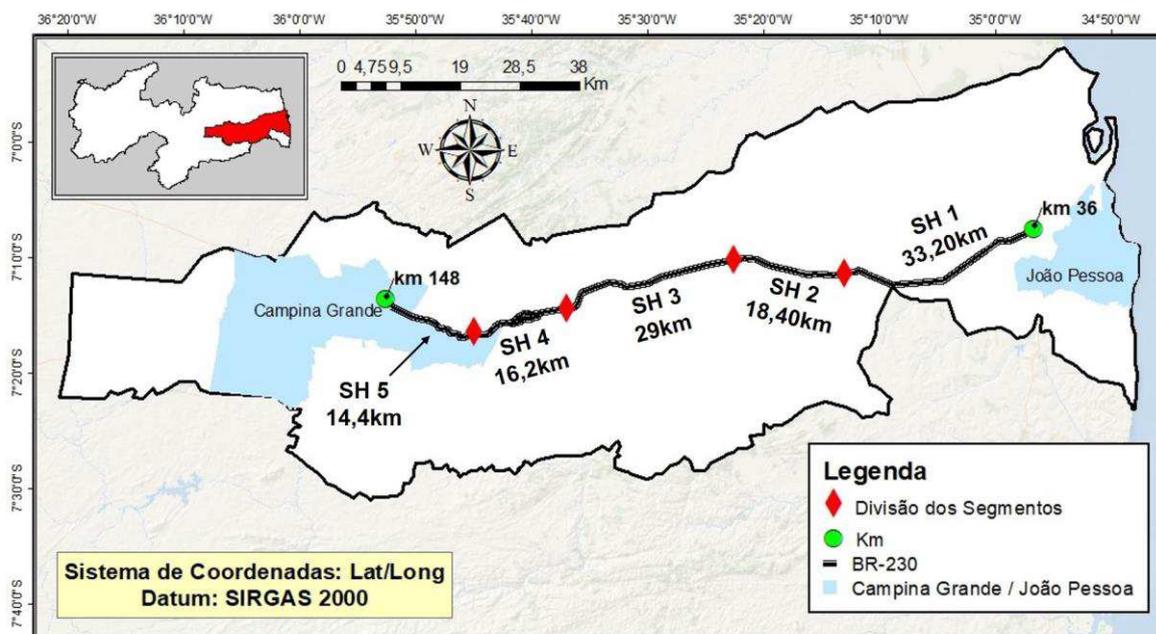


Figura 42. Mapa da divisão dos segmentos homogêneos do trecho da área de estudo. Fonte: próprio Autor.

A partir da divisão dos segmentos homogêneos, foi possível separar os dados dos levantamentos de todo trecho para avaliação individual de cada segmento. Para cálculo dos valores característicos de deflexão e IRI foi utilizada a metodologia do procedimento DNER-PRO 011/79. Diante os resultados apresentados na Tabela 38 foi possível verificar que a menor deflexão característica ocorreu no segmento homogêneo 1 e a maior deflexão no segmento homogêneo 2. O menor valor de irregularidade está presente no segmento 1, enquanto o maior valor do IRI foi encontrado no segmento 2.

Tabela 38. Valores característicos de Deflexão e IRI para cada segmento.

Segmentos	Deflexão (Dc)	IRI
SH 1	32	2,39
SH 2	102	5,30
SH 3	78	4,23
SH 4	79	3,71
SH 5	81	3,60

Fonte: próprio Autor.

A Superintendência Regional do DNIT do estado da Paraíba forneceu os dados do Volume Médio Diário (VMD) referente a contagem de veículos em 15 postos de contagem ao longo do trecho da área de estudo. A partir do VMD característico calculado, foi simulado com base em informações do PNCT (Plano Nacional de Contagem de Tráfego) a

proporcionalidade e os tipos de veículos que passam pelo trecho, possibilitando, assim, o cálculo dos Fatores de Veículos (FV) pelo método da AASHTO e pelo método do Corpo dos Engenheiros (USACE), conforme IPR – 723 (DNIT, 2006). O maior valor calculado para o número N de tráfego foi da metodologia USACE que por sua vez resultou em um número na ordem de $2,00 \times 10^6$. Dessa forma a Deflexão Admissível (D_{adm}) para o trecho da área de estudo foi de 80 ($10^{-2}mm$). Avaliando todos os valores das deflexões características e comparando com a deflexão admissível da rodovia, é possível verificar que o segmento 1 apresentou valor de deflexão característica (32) bem abaixo do valor da deflexão admissível (80). Os segmentos 3 e 4 apresentaram valores abaixo, porém muito próximos da deflexão admissível. Os valores dos raios de curvaturas foram calculados a partir da deflexão característica de cada trecho, fornecendo um valor de raio de curvatura característico. Dessa forma, utilizando a Tabela 15, foi possível associar um critério de avaliação estrutural para cada segmento (Tabela 39).

Tabela 39. Raios de curvatura e critério de avaliação estrutural para cada segmento.

Segmentos	Deflexão (Dc)	Raio de Curvatura	Critério
SH 1	32	107	BOA
SH 2	102	134	MÁ
SH 3	78	46	REGULAR PARA MÁ
SH 4	79	46	REGULAR PARA MÁ
SH 5	81	43	MÁ

Fonte: próprio Autor.

A avaliação funcionalmente do trecho presente na área de estudo através do LVC (DNIT 008/2003 – PRO) e cálculo do Índice de gravidade global (IGG) segundo a norma DNIT 006/2003 – PRO estabeleceu avaliar objetivamente a superfície do pavimento flexível. As tabelas contendo os resumos de cálculos obtidos para cada segmento seguem no ANEXO II.

Em resumo, a Tabela 40 contém os resultados de IGG bem como o conceito do mesmo para cada segmento. Foi possível verificar que o menor valor do IGG ocorreu no segmento homogêneo 1 e o maior valor no segmento homogêneo 2.

Tabela 40. IGG e conceito obtido para cada segmento homogêneo.

Segmentos	IGG	Conceito
SH 1	32	BOM
SH 2	202	PÉSSIMO
SH 3	129	RUIM
SH 4	124	RUIM
SH 5	129	RUIM

Fonte: próprio Autor.

A Tabela 41 sintetiza todos os resultados de desempenho do pavimento da área de estudo sob os aspectos funcional e estrutural.

Tabela 41. Resumo dos resultados da avaliação funcional e estrutural.

Segmentos	Deflexão		IRI		IGG	
	Valor	Conceito	Valor	Conceito	Valor	Conceito
SH 1	32	BOA	2,39	BOM	32	BOM
SH 2	102	MÁ	5,30	MAU	202	PÉSSIMO
SH 3	78	REGULAR PARA MÁ	4,23	MAU	129	RUIM
SH 4	79	REGULAR PARA MÁ	3,71	REGULAR	124	RUIM
SH 5	81	MÁ	3,60	REGULAR	129	RUIM

Fonte: próprio Autor.

Para facilitar a visualização e avaliação dos resultados, a Figura 43 contém todos os resultados de desempenho do pavimento da área de estudo sob os aspectos funcional e estrutural.

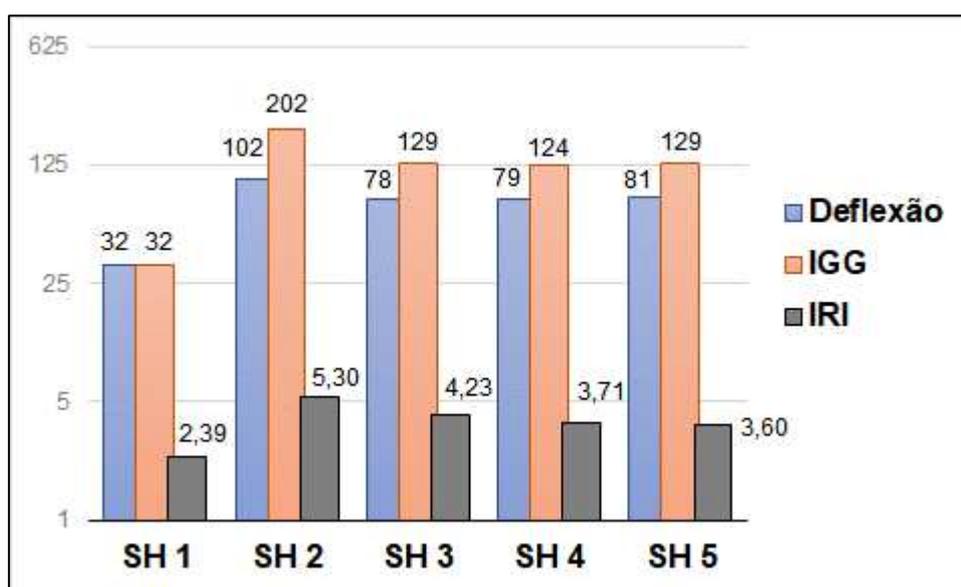


Figura 43. Resumo dos resultados da avaliação funcional e estrutural. Fonte: próprio Autor.

O Segmento Homogêneo 1 (SH1) apresentou os melhores resultados quanto a avaliação aplicada ao trecho no ano de 2021, com conceito para deflexão característica, quando comparada a deflexão admissível, de BOA, bem como a menor irregularidade longitudinal com conceito BOM e menor IGG, também, com conceito BOM. Já o Segmento Homogêneo 2 (SH2) apresentou os piores resultados quanto a avaliação, com conceito para deflexão característica MÁ, bem como a maior irregularidade longitudinal com conceito MAU e maior IGG com conceito PÉSSIMO. Os demais segmentos também apresentaram baixas avaliações com conceitos chegando à MÁ, REGULAR e RUIM para deflexão, IRI e IGG, respectivamente. A baixa avaliação dos segmentos 2, 3, 4 e 5 pode estar relacionada com a falta de reparos que esse trecho da BR-230 sofreu desde a sua construção, apesar disso o segmento 1 apresentou bons resultados, possivelmente associado as boas condições de vulnerabilidade encontradas na sua área.

Quando inserido a divisão dos segmentos no mapa de vulnerabilidade geral que compõe o IVP (Figura 40), com base na calculadora de Raster que sintetiza a média das variáveis a partir da álgebra de mapas, é possível verificar na Figura 44, em um mapa ampliado, que o segmento 1 distribui-se numa área composta de vulnerabilidade totalmente, moderadamente e medianamente estável, corroborando com os bons índices da avaliação funcional e estrutural. Também é possível verificar que o segmento 2 está distribuído em área de bastante vulnerabilidade, com domínio de vulnerabilidade extrema, compactuando com os piores resultados dos índices de avaliação.

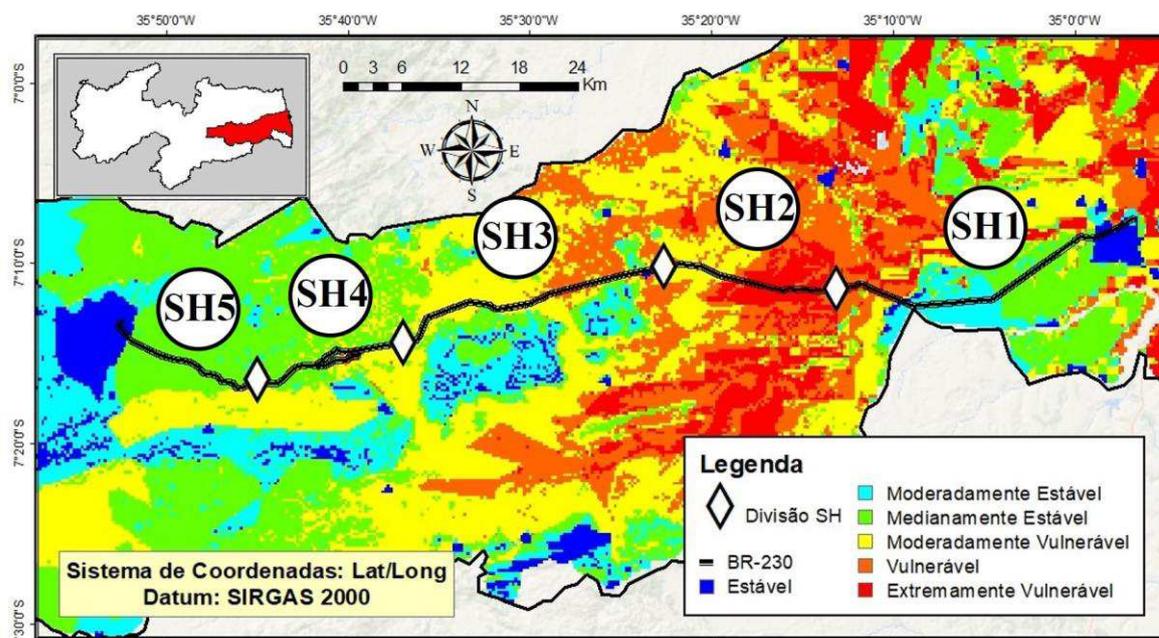


Figura 44. Divisão dos segmentos homogêneos no mapa do IVP a partir da álgebra de mapas. Fonte: próprio Autor.

O segmento 3 também está distribuído em áreas que contém vulnerabilidades altas e moderadas, confirmando os baixos valores da avaliação. É importante lembrar que não necessariamente um segmento que apresentou baixa avaliação funcional e estrutural vai estar distribuído em áreas de alta vulnerabilidade, é o caso dos segmentos 4 e 5 que estão distribuídos em áreas com predominância de estabilidade. Isso pode acontecer pois apesar da área ser estável quanto as 9 variáveis envolvidas no processo, o pavimento precisa sofrer intervenções durante o tempo para aumentar o seu grau de serventia, ou seja, o pavimento flexível, independente das condições a que está submetido, é dimensionado, no Brasil, para um período de 10 anos, se este não for avaliado para possível restauração durante o decorrer do final desse tempo, possivelmente este pode apresentar comprometimento nos seus índices avaliativos, mesmo estando em área de baixa vulnerabilidade. Essa condição possivelmente deve estar associada aos segmentos 4 e 5.

5.12 Análise Fatorial

O conjunto de dados originou-se da classificação das 9 classes utilizadas no cálculo do IVP da álgebra de mapas, para os 71.241 pontos representativos de cada pixel que compõe a área de estudo, buscando, assim, por meio da análise fatorial obter um conjunto reduzido de classes que fosse capaz de resumir, caracterizar e representar a vulnerabilidade quanto a degradação do pavimento na região estudada. O conjunto de dados já se encontrava normalizado devido a reclassificação feita na etapa de adequação dos critérios de degradação para cada classe, sendo estes, valores que variam entre 1 e 3. A Tabela 42 tem a estatística descritiva das variáveis.

Tabela 42. Estatística Descritiva das variáveis.

Variável	Média	Desvio Padrão	N
Geomorfologia (V ₁)	121,08	50,63	71241
Uso e ocupação do solo (V ₂)	204,85	60,63	71241
Drenagem (V ₃)	166,82	84,66	71241
MDE (V ₄)	169,59	68,86	71241
Precipitação (V ₅)	99,79	75,01	71241
Declividade (V ₆)	281,82	27,08	71241
Solos (V ₇)	217,60	63,56	71241
Textura (V ₈)	206,45	104,49	71241
Geologia (V ₉)	161,11	54,35	71241

Fonte: Autor, 2021.

Para Hair et al. (2006) a amostra deve ser superior a 50 observações, sendo indicado no mínimo 100 casos para garantir melhores resultados. A amostra apresenta um número de casos bastante elevado e que por sua vez respeita o critério mínimo de observações. A proporção do número de casos por variável, 71.241 casos / 9 variáveis, resulta em um valor numerosamente acima do mínimo recomendado, que segundo o autor deve exceder cinco para um ou mais.

A Tabela 43 exibe a Matriz de Correlação das variáveis que por sua vez apresentou boa parte das correlações maior que 0,30, seguindo a recomendação de Hair et al. (2006), determinando, assim, que os dados são adequados a utilização da análise fatorial.

Tabela 43. Matriz de Correlação.

	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉
V ₁	1,00								
V ₂	-0,30	1,00							
V ₃	-0,77	0,24	1,00						
V ₄	0,45	-0,50	-0,28	1,00					
V ₅	0,57	-0,48	-0,44	0,86	1,00				
V ₆	0,21	-0,15	-0,17	0,23	0,11	1,00			
V ₇	-0,14	0,25	0,10	-0,40	-0,31	-0,30	1,00		
V ₈	-0,30	0,21	0,36	0,02	-0,05	-0,07	-0,15	1,00	
V ₉	0,53	-0,38	-0,46	0,50	0,63	0,15	-0,22	-0,28	1,00

Fonte: Autor, 2021.

De acordo com a Tabela 44 foi possível identificar por meio do teste KMO, os modelos presentes entre os parâmetros utilizados, bem como a adequabilidade da amostra. O valor médio indicado pela estatística do teste foi de 0,74, compreende-se que o teste KMO apresenta valores entre 0 e 1, sendo estes quanto mais próximo de 1 maior será a eficácia de extração da variável. Alguns autores sugerem classificações quanto ao nível em que os valores se encontram, Hair et al (2006) sugerem 0,50 como patamar aceitável, Pallant (2007) e Friel (2009) sugerem valores acima de 0,6 como limiares razoáveis para extrações iniciais e Friel (2009) afirma que valores entre 0,70 e 0,79 são considerados como medianos.

Tabela 44. Kaiser-Meyer-Olkin: medida de adequação da amostragem.

Classes	KMO
Geomorfologia	0,77
Uso e ocupação do solo	0,90
Drenagem	0,71
MDE	0,69
Precipitação	0,70
Declividade	0,59
Solos	0,78
Textura	0,65
Geologia	0,87
KMO	0,74

Fonte: Autor, 2021.

Após a verificação da adequabilidade da amostra foi possível extrair os fatores principais que irão constituir a capacidade de explicação da variância total do agrupamento dos dados. Através de uma compreensão básica sobre como a variância pode ser particionada, foi escolhido o método de extração de análise de fatores comuns ao invés do método de análise de componentes. De acordo com Hair et al. (2009) a análise de fatores comuns é usada prioritariamente para identificar fatores ou dimensões latentes que refletem o que as variáveis têm em comum ou compartilhada, comunalidades (ao contrário de unidades) são inseridas na diagonal, assumindo que tanto a variância de erro quanto a única não são de interesse na definição da estrutura das variáveis. Se o interesse do pesquisador for numa solução teórica não contaminada por oscilação de erro, a análise de fatores comuns deve ser sua escolha (Tabachnick & Fidell, 2007). A Tabela 45 tem os *Eigenvalues* (autovalores) e a variância acumulada.

Tabela 45. *Eigenvalues* e a variância acumulada.

	<i>Eigenvalue</i>	Variância (%)	Acumulado (%)
F1	3,46	38,50	38,50
F2	1,06	11,82	50,32
F3	0,52	5,80	56,10
F4	0,24	2,65	58,76
F5	0,06	0,64	59,41
F6	0,03	0,27	59,70

Fonte: Autor, 2021.

A Figura 45 aponta a distribuição dos autovalores no *Scree plot*, que de acordo com Hair et al. (2009) é determinado construindo o gráfico das raízes latentes em correlação ao número de fatores em sua ordem de extração, o ponto de corte é avaliado verificando-se a forma da curva resultante. Conforme Slodkowski et al. (2019) o ponto em que a inclinação

suaviza indica o número de fatores a ser usados, que em geral é superior ao revelado pelos autovalores. O gráfico é baseado no teste *scree* que, segundo o autor, previamente à quantia de variância única começar a dominar a estrutura de variância comum, é utilizado para identificar o número ótimo de fatores que podem ser extraídos.

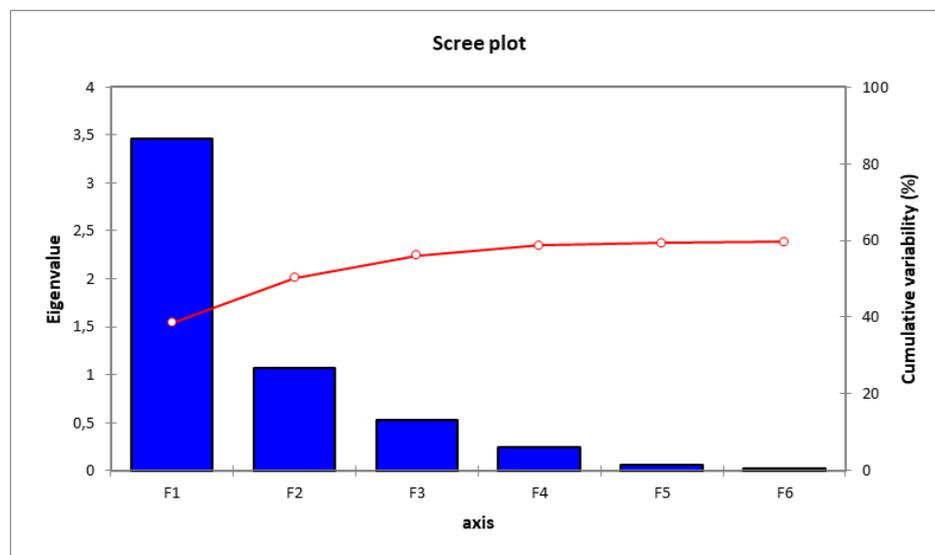


Figura 45. *Scree plot*: Curva da variância individual de cada fator. Fonte: próprio Autor.

Para definir a quantidade de fatores que precisam ser extraídos, afim de determinar aqueles que melhor representam o padrão de correlação entre as variáveis observadas, a literatura, apesar de não existir um critério consensual, aponta alguns métodos de auxílio. Hair et al. (2006) indica o critério da variância acumulada sugerindo o patamar aceitável de 60%, onde a extração dos fatores deve continuar até que o patamar mencionado seja alcançado. Já citado anteriormente, Cattell (1966) define o método auxiliar do *Scree test*, indicando uma análise gráfica da dispersão do número de fatores do *Scree plot* até que a curva da variância para cada fator horizontalize ou sofra uma queda repentina, indicando, nas duas situações, que é necessário parar de extrair fatores considerando que uma quantidade importante de variância foi perdida. A regra do autovalor (*eigenvalue*), critério de Kaiser-Guttman, sugere, segundo Patil et al. (2008), que se deve extrair apenas os fatores com valor de *eigenvalue* > 1, pois abaixo desse valor o fator contribui pouco para explicar a variância nas variáveis originais.

Tendo em vista que a variância acumulada atinge quase 60% no último fator gerado é necessário a associação de mais critérios para a extração. Ao utilizar o critério da raiz latente, apenas 2 fatores teriam sido considerados, porém associando ao teste *scree* foi possível acrescentar 1 fator a mais. De acordo com Hair et al. (2009), como regra geral, o

teste *scree* tem como efeito o acréscimo de, pelo menos, 1 e às vezes 2 ou 3 fatores a mais sendo considerados para inclusão em relação ao critério da raiz latente. A Tabela 46 tem o padrão de fatores extraídos e as comunalidades associadas a cada variável.

Tabela 46. Fatores extraídos e comunalidades associadas.

Classes	F1	F2	F3	Comunalidade		Variância Específica
				Inicial	Final	
V ₁	0,76	-0,39	-0,04	1,00	0,74	0,26
V ₂	-0,52	-0,11	0,006	1,00	0,28	0,72
V ₃	-0,66	0,53	0,06	1,00	0,73	0,27
V ₄	0,80	0,45	0,05	1,00	0,85	0,15
V ₅	0,90	0,28	0,29	1,00	0,97	0,03
V ₆	0,28	0,06	-0,57	1,00	0,41	0,59
V ₇	-0,35	-0,35	0,31	1,00	0,34	0,66
V ₈	-0,23	0,44	-0,006	1,00	0,25	0,75
V ₉	0,68	-0,08	0,07	1,00	0,48	0,52

Obs.: Os valores em **negrito** correspondem, para cada variável, ao fator para o qual o cosseno quadrado é o maior.

Fonte: Autor, 2021.

As comunalidades de cada variável representam a proporção de variância explicada pelos fatores comuns em uma variável. Seu valor aceitável, sugerido por Hair et al. (2009), é acima de 0,5, a baixa comunalidade entre um grupo de variáveis é um indício de que elas não estão linearmente correlacionadas e em perspectivas mais conservadoras, é aconselhável excluí-las e realizar novamente a análise fatorial. A interpretação das comunalidades consiste em entender quais variáveis mais impactam no modelo. Além disso, foi observado que o Fator 1 (F1) apresenta quase 70% da capacidade de explicar a variabilidade acumulada quando comparada aos outros dois fatores extraídos (F2 e F3). O gráfico da Figura 46 tem a distribuição das cargas fatoriais plotadas para os eixos F1 e F2, que por sua contém 50,32% da variância acumulada.

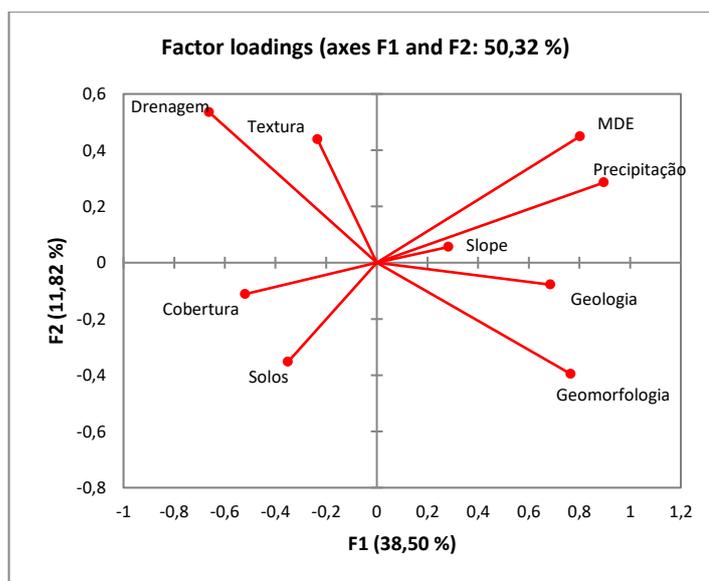


Figura 46. Cargas fatoriais (eixos F1 e F2: 50,32%). Fonte: próprio Autor.

Dessa forma, as variáveis que apresentaram as maiores cargas fatoriais e as maiores comunalidades do grupo F1, antes da rotação, de acordo com a Tabela 50, são: Precipitação (V₅), MDE (V₄), Geomorfologia (V₁) e Geologia (V₉). Sendo estas as que apresentaram, inicialmente, a maior porção da variância compartilhada com todas as outras variáveis consideradas.

Como sequência da Análise Fatorial, as variáveis foram rotacionadas em relação aos componentes extraídos utilizando o método de rotação fatorial ortogonal VARIMAX. De acordo com Hair et al. (2009) o método VARIMAX é o mais popular entre os métodos de rotação, concentra-se na simplificação das colunas em uma matriz fatorial, obtém uma estrutura fatorial mais simples e potencializa a soma de variâncias de cargas requeridas da matriz fatorial. A partir da rotação é possível identificar quais variáveis caracterizam de forma mais adequada os fatores, facilitando, assim, a interpretação dos resultados. Para Pallant (2007), esse método visa minimizar o número de variáveis que apontam altas cargas nos diferentes fatores. A Tabela 47 tem a matriz de rotação e a porcentagem de cada variância bem como a variância acumulada. É possível observar que os dois primeiros fatores rotacionados explicam quase 50% da variância total, sendo 28,4% e 19,3%, respectivamente.

Tabela 47. Matrix e Porcentagem de variância após a rotação Varimax.

	D1	D2	D3	Variância (%)	Acumulado (%)
D1	0,80	0,53	0,27	28,40	28,40
D2	0,49	-0,85	0,22	19,34	47,74
D3	0,34	-0,04	-0,94	8,37	56,12

Fonte: Autor, 2023.

A Tabela 48 contém as correlações entre variáveis e fatores após a rotação. Nesse contexto foi observado que para o primeiro fator (D1) destacou-se a Precipitação (0,98), seguido do MDE (0,87) e da Geologia (0,72); para o segundo fator (D2) quem se destaca é a Geomorfologia (0,85) e, por fim, para o terceiro fator (D3) a Declividade (0,82) é quem apresenta maior evidência.

Tabela 48. Variáveis e fatores após a rotação Varimax.

Classes	D1	D2	D3
Geomorfologia	0,48	0,85	0,14
Uso e ocupação do solo	-0,56	-0,27	-0,15
Drenagem	-0,40	-0,90	-0,10
MDE	0,87	0,14	0,42
Precipitação	0,98	0,40	0,05
Declividade	0,09	0,08	0,82
Solos	-0,39	0,04	-0,54
Textura	-0,15	-0,53	0,13
Geologia	0,72	0,51	0,16

Fonte: Autor, 2021.

Assim o modelo denota que boa parte das variâncias das variáveis em destaque foi explicada pelos respectivos fatores associados, podendo descrever o processo de vulnerabilidade do pavimento quando associado ao sistema de deterioração que provoca a redução do tempo de vida útil do trecho rodoviário (BR-230) presente na área estudada.

Após a normalização dos valores fatoriais rotacionados, foi possível gerar os mapas de vulnerabilidade para cada grupo com o objetivo de visualizar espacialmente a distribuição dos fatores na área de estudo afim de identificar a influência positiva ou negativa das variáveis nos diferentes fatores. A Figura 47 tem a distribuição da vulnerabilidade do fator D1 normalizado na área de estudo, variando de estável até extremamente vulnerável.

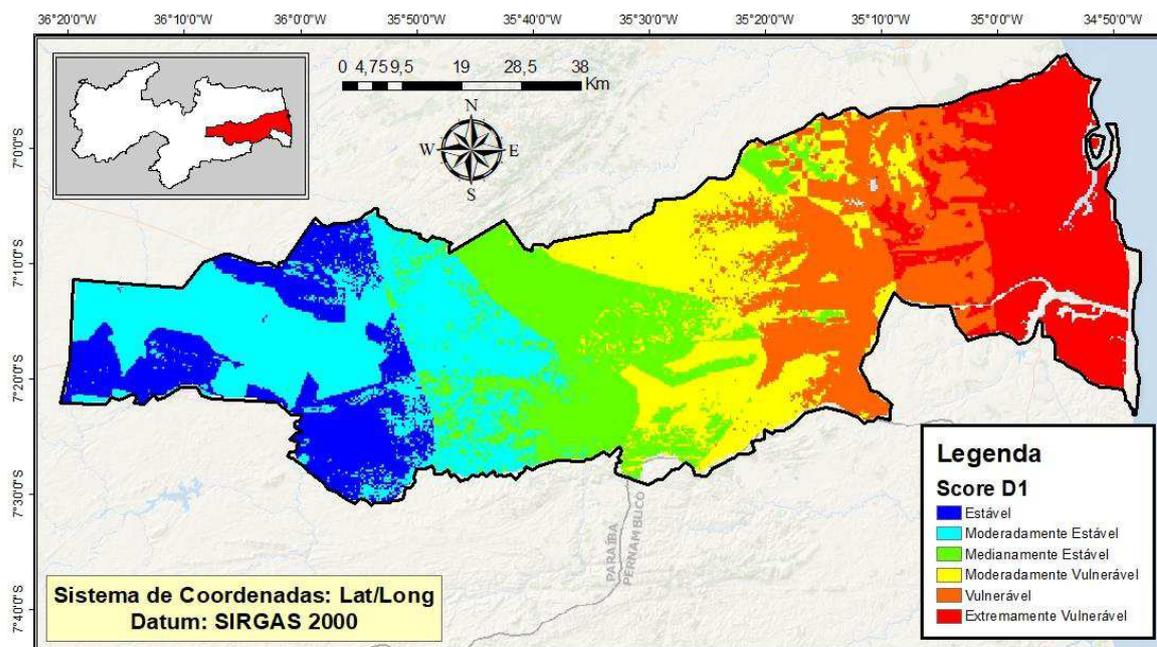


Figura 47. Mapa de vulnerabilidade do fator D1 normalizado. Fonte: próprio Autor.

É possível identificar, no mapa da Figura 47, a forte influência da Precipitação com carga fatorial de 0,98. A distribuição pluviométrica da área de estudo é crescente da porção ocidental para a porção oriental, ou seja, à medida que se aproxima do litoral a precipitação aumenta, influenciando, assim em uma maior vulnerabilidade na porção Leste. A variação pluviométrica vai de 316mm a 719mm referentes a série histórica de 25 anos (1994-2019). Quanto maior a intensidade das chuvas maior será a vulnerabilidade devido ao impacto na degradação do pavimento.

O MDE também se destaca na área de estudada com carga fatorial de 0,87 (Figura 47). A estabilidade dessa variável é associada as maiores declividades longitudinais do pavimento, concebendo uma maior drenagem e impedindo que a água permaneça mais tempo no pavimento. Contrário a esse efeito a porção litorânea da área de estudo apresenta alta vulnerabilidade devido a sua baixa declividade.

Do mesmo modo, a Geologia é representada na área estudada (Figura 47) com carga fatorial de 0,72. A porção oriental é geologicamente composta por rochas menos coesas que, segundo as considerações metodológicas, apresentam maior vulnerabilidade pois são susceptíveis as intempéries e tendem a apresentar solos mais finos e de baixa resistência.

A Figura 48 tem a distribuição da vulnerabilidade do fator D2 normalizado na área de estudo, variando de estável até extremamente vulnerável.

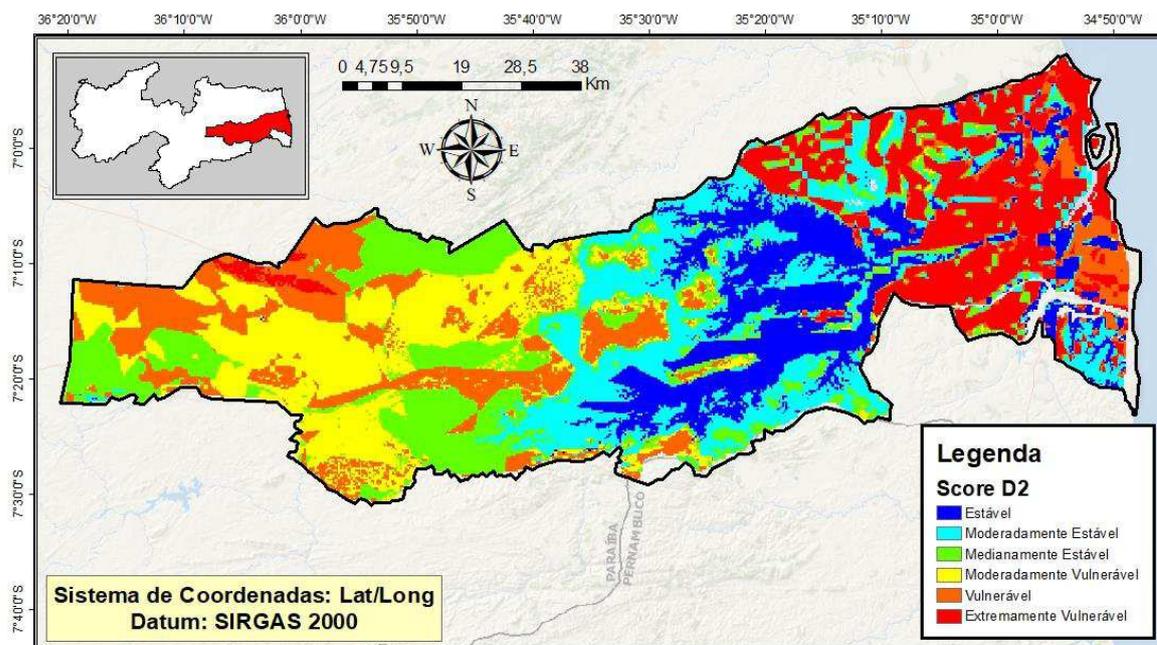


Figura 48. Mapa de vulnerabilidade do fator D2 normalizado. Fonte: próprio Autor.

O mapa da Figura 48 tem domínio da Geomorfologia com carga fatorial de 0,85. A área de estudo apresenta baixa vulnerabilidade, basicamente na totalidade das microrregiões de Campina Grande, Itabaiana e Sapé, e parte da microrregião de João Pessoa, composta pelas unidades geomorfológicas que apresentam declividade mais acentuadas. Já as áreas de alta vulnerabilidade são compostas por unidades geomorfológicas caracterizadas pelas particularidades que constituem o litoral. Nessas regiões, de baixa declividade, a água fica por mais tempo em contato com as camadas do pavimento e provavelmente otimiza a degradação.

A Figura 49 tem a distribuição da vulnerabilidade do fator D3 normalizado na área de estudo, variando de estável até extremamente vulnerável.

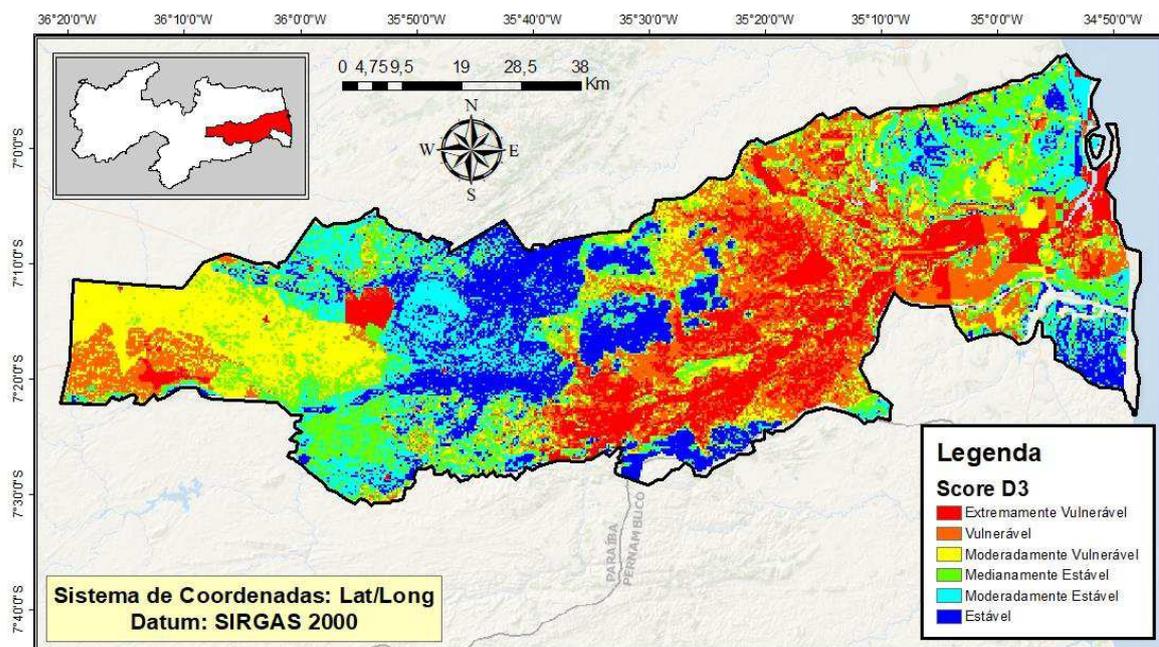


Figura 49. Mapa de vulnerabilidade do fator D3 normalizado. Fonte: próprio Autor.

O mapa da Figura 49 tem maior ação da Declividade com carga fatorial de 0,82. Na parte central da região é encontrada uma alta vulnerabilidade, pois esta tem forte composição de baixas declividades que, por sua vez, dificulta o escoamento da água, diminuindo, assim, a drenagem superficial, ou seja, a baixa declividade apresenta maior vulnerabilidade pois faz com que a água fique por mais tempo em contato com as camadas do pavimento.

6. CONCLUSÕES

De forma geral, a partir da observação visual dos mapas criados, é possível perceber que a construção de mapas é uma ferramenta de grande importância na orientação do estudo de vulnerabilidade voltado para a degradação de pavimentos. Tendo em vista que a definição de regiões estáveis ou instáveis quanto ao tema, possibilitou identificar onde o pavimento pode estar submetidos a condições de entorno que apresente características de vulnerabilidade distribuindo-se desde moderada a condições de extrema instabilidade.

Avaliando as combinações de classificação que apresentaram algum tipo de vulnerabilidade e que compreenderam pouco mais de 49% da área de estudo, foi possível verificar que estas regiões, em sua maioria, apresentaram características que predominam elementos contribuintes para a degradação do pavimento como formações geológicas susceptíveis a intempéries, uso e ocupação do solo com predominância de atividades agropecuárias e urbanização, baixas declividades e amplitudes altimétricas, intensidade pluvial acima da média de chuvas do estado e solos que possam apresentar na sua constituição a presença de material argiloso.

Examinando as combinações de classificação que apresentaram algum tipo de estabilidade, pouco mais de 50% da área de estudo, foi possível verificar que estas regiões, em sua maioria, apresentaram características que predominam elementos como formações geológicas menos susceptíveis a intempéries, uso e ocupação do solo com predominância de áreas com maior grau de preservação, maiores declividades e amplitudes altimétricas, menores intensidades pluviais e solos que possam apresentar na sua constituição a presença de material arenoso.

Quando foi feita a comparação entre os resultados máximos e mínimos gerados pela álgebra de mapas e a avaliação estrutural e funcional do pavimento, observou-se que o segmento homogêneo 1 é o melhor avaliado no que se diz respeito a estar distribuído numa área composta de vulnerabilidade bastante estável e apresentar, ao mesmo tempo, bons índices de avaliação do pavimento. Já o segmento homogêneo 2 apresentou a pior avaliação no que se diz respeito a sua distribuição em área de grande vulnerabilidade e os piores resultados dos índices de avaliação gerados. É importante lembrar que apesar dos valores extremos da sobreposição de mapas e a avaliação do pavimento estarem em conformidade quando comparados, pode acontecer, também, como é o caso dos segmentos 4 e 5, que o pavimento esteja em áreas com predominância de estabilidade e apresentem baixos índices de avaliação funcional e estrutural. Apesar da área ser estável, o pavimento contido nessa região, dimensionado para 10 anos, precisa sofrer restaurações durante o tempo afim de

corrigir os defeitos e aumentar a sua serventia, ou seja, os baixos índices de avaliação, podem estar relacionados com o tempo de reabilitação do pavimento, e não com a o grau de vulnerabilidade do entorno.

Antes da rotação Varimax, a Análise Fatorial mostrou que o Fator 1 apresentou quase 70% da capacidade de explicar a variabilidade acumulada quando comparada aos outros dois fatores extraídos. Dessa forma, as variáveis do grupo F1 que apresentaram as maiores cargas fatoriais e as maiores comunalidades, que consiste em entender quais variáveis mais impactam no modelo, foram: Precipitação (V5), MDE (V4), Geomorfologia (V1) e Geologia (V9). Portanto a primeira parte da AF já comprovou a importância do agente 'água' a partir da variável Precipitação que por sua vez tem sua presença, como agente degradador, em todas outras variáveis; do agente 'topografia' a partir das variáveis MDE e Geomorfologia; e do agente 'solos' a partir da variável Geologia que é importante para explicar a formação dos tipos de solos presentes na área de estudo.

Após a rotação fatorial, a vulnerabilidade do fator D1 sofreu forte influência da Precipitação com carga fatorial de 0,98, sendo a distribuição pluviométrica crescente da porção ocidental para a porção oriental. Nesse mesmo grupo houve destaque para o MDE com carga fatorial de 0,87 e Geologia com carga fatorial de 0,72. A distribuição da vulnerabilidade do fator D2 apresentou domínio da Geomorfologia com carga fatorial de 0,85 e o grupo do fator D3 apresentou maior ação da Declividade com carga fatorial de 0,82. Mesmo após a rotação a presença de variáveis que tem como agentes a água, a topografia e o solo, continuaram com forte influência na variabilidade dos dados da área de estudo.

A técnica estatística multivariada por intermédio da aplicação da Análise Fatorial destacou cinco das nove variáveis envolvidas no modelo (Precipitação, MDE, Geomorfologia, Geologia e Declividade), porém esse destaque não exclui do mesmo processo as variáveis com menor impacto como uso e ocupação do solo, tipos de solo, drenagem e textura, pois para uma avaliação do efeito da degradação de pavimentos é necessário a implementação do maior número de variáveis possíveis com o intuito de chegar a resultados cada vez mais significativos. As variáveis que apresentaram efeitos negativos/contrários ou de pouco destaque podem, em uma nova área de estudo, apresentarem maior influência e efeitos positivos na variância dos dados. Essa observação também aponta para uma característica de mudança constante dos intervalos das classes do IVP, ou seja, os intervalos do IVP dependerão da variabilidade dos dados da área de estudo trabalhada e dessa forma a influência e o comportamento positivo ou negativo das variáveis também sofrerão alterações.

A importância da criação de um índice que possa, através de um valor numérico embasado em uma metodologia adequada, classificar a vulnerabilidade quanto a degradação do pavimento de uma determinada localidade, é um significativo instrumento que possibilita a aplicação de uma técnica que tem como objetivo ajudar no gerenciamento e na tomada de decisão no que se diz respeito ao dimensionamento de projetos de pavimentação mais eficazes quanto a condições naturais e antrópicas, sendo assim mais uma estratégia de investigação por meio dos órgãos responsáveis para melhorar a qualidade dos pavimentos.

Várias pesquisas futuras poderão ser realizadas a partir desse trabalho, como por exemplo: aplicar a metodologia de sobreposição de mapas combinada com análise multivariada em outros trechos de rodovias afim de verificar o comportamento das variáveis em cada área de estudo; aumentar o número de variáveis do processo, adicionando, por exemplo, umidade da superfície do solo e temperatura da superfície terrestre, influentes no processo de degradação do pavimento; analisar o comportamento da vulnerabilidade a partir do efeito de cenários futuros, principalmente no que se diz respeito a modificação da precipitação ao longo dos anos; desenvolver complementos/aplicativos programados com a metodologia proposta afim de possibilitar a aplicação em softwares de geoprocessamento ou outros diferentes tipos de plataformas computacionais.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AASHTO. Guide for design of pavement structure. Appendix J: Analysis Unit Delineation By Cumulative Differences. American Association of State Highway and Transportation Official, Washington D.C. 1993.
- Almeida, A. J. Avaliação da Influência da Ação da Água e da temperatura no Comportamento Reológico e no Desempenho Mecânico das Misturas Asfálticas. Tese de Doutorado. Universidade federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Santa Catarina, 2017.
- Almeida, A. T. Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de Decisão Multicritério. Atlas. 1ª edição, 2013.
- Almeida, L. Q. Vulnerabilidades Socioambientais de Rios Urbanos. Bacia Hidrográfica do Rio Maranguapinho. Região Metropolitana de Fortaleza, Ceará. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Rio Claro/SP, 2010.
- Andrade, J. R.; Snatos, S. C. Estudo sobre o Desmatamento da Mata Atlântica na Paraíba. REBES - Revista Brasileira de Educação e Saúde. GVAA - Grupo Verde de Agroecologia e Abelhas - Pombal – PB. v. 4, n. 2, p. 24-33, mai.-jun., 2014.
- Antônio, A. C. Propriedades de solo II – Textura, Cor e Porosidade. e-Tec Brasil – Solos (2016). Disponível em: http://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/586/Aula_03.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acessado em: 04/08/2021.
- ANTT. Recurso de Desenvolvimento Tecnológico RDT: Irregularidade Longitudinal de Pavimentos: Correlação entre QI e IRI e Comparação de Equipamentos. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2017.
- Aquino, A. R.; Paletta, F. C.; Almeida, J. R. Vulnerabilidade Ambiental. São Paulo: Blucher, 2017.
- Azevedo, J. V. V.; Souza, P. M.; Santos, C. A. C.; Silva, M. T.; Santos, D. A. S. Aplicação da Análise Fatorial para Determinação da Vulnerabilidade Socioeconômica e Ambiental nos Municípios do Estado da Paraíba. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.4, p.97-111, 2019.
- Balbo, J. T. Pavimentação Asfáltica - Materiais, Projeto e Restauração. Ed. Oficina de Textos, São Paulo/SP, 2007.

- Barbosa, C. C. F. Álgebra de Mapas e suas Aplicações em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento. Dissertação de Mestrado. INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 1999.
- Barbosa, P. G. Análise Geomorfológica como Fator de Vulnerabilidade Ambiental em Regiões Serranas: Uma Proposta a Gestão Territorial na Microrregião da Serra do Teixeira-PB. Dissertação Mestrado. Campina Grande: UEPB, 122p. 2020.
- Basso, M. T. Análise Fatorial e uma Aplicação em Perfil de Compras de Pequenos Varejistas. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Matemática da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia 2016.
- Bernucci, L. B.; Camacho, J.; Marinho, F. M.; Noagami, J. S. Efeitos da Sucção e da Temperatura na Movimentação d'água em Pavimentos Construídos em Solos Lateríticos. Anais. Rio de Janeiro: ANPET, 2000.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2007.
- Bernucci, L. B.; Motta, L. M. G.; Ceratti, J. A. P.; Soares, J. B. Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2ª edição, 2022.
- Berre, L. I.; Meur-Ferec, C.; Cuq, V.; Guillou, E.; Lami, T.; Dantec, N.; Letortu, P.; Lummert, C.; Philippe, M.; Rouan, M.; Noûs, C.; Hénaff, A. Systemic vulnerability of coastal territories to erosion and marine flooding: A conceptual and methodological approach applied to Brittany (France). *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Volume 78, August, 2022.
- Bezerra, F. J. A.; Bernardo, T. R. R.; Ximenes, L. J. F.; Junior, A. S. V. Perfil Socioeconômico da Paraíba – Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2015.
- Botelho, M. A. Incorporação de Facilidades Espaço-Temporais em Bancos de Dados Orientados a Objetos. Dissertação de Mestrado. Instituto de Matemática, Estatística e Ciência da Computação, UNICAMP. Recife, 1995.
- Branco, P. M. Minerais Argilosos (2014). Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/CPRM-Divulga/Minerais-Argilosos-1255.html>. Acessado em: 10/06/2021.
- Brandão, R. A. Análise da Vulnerabilidade Ambiental da Bacia do Rio das Flores – Oeste de Santa Catarina. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Francisco Beltrão/PR, 2020.

- Brandão, V. S. Infiltração de Água em Solos Sujos a Encrostamento. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2003.
- Brubacher, J. P.; Oliveira, G. G.; Guasselli, L. A. Suscetibilidade de Enchentes a partir da Análise das Variáveis Morfométricas na Bacia Hidrográfica do Rio dos Sinos/RS. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, INPE p.1279, 2011.
- Cabral, J. B. P.; Becegato, V. A.; Lucena, L. R. F.; Scopel, I. Intensidade Pluviométrica e Vulnerabilidade à Erosão do Solo na Área de Drenagem do Reservatório de Cachoeira Dourada-GO/MG (2005). Revista Eletrônica do Curso de Geografia do campus Avançado de Jataí-GO. Nº 4, jan-jun 2005. Disponível em: <https://www.revistas.ufg.br/geoambiente/article/view/25870/14860>. Acessado em: 28/07/2021.
- Calbete, N. O.; Calbete, S. R.; Rozante, J. R.; Lemos, C. F. Precipitações Intensas Ocorridas no Período de 1986 a 1996 no Brasil (2013). Disponível em: <http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliensp10a/11.html>. Acessado em: 08/06/2021.
- Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. Introdução à Ciência da Geoinformação. INPE, São José dos Campos, 2001.
- Cattell, R. B. The Scree Test for the Number of Factors. *Multivariate Behavioral Research*, 1(2), 245-276, 1966.
- Chaves, M. A. Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistentes para a Bacia Amazônica. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2002.
- Christofolletti, A. Geomorfologia Fluvial: O Canal Fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 1981.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2019: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SET: SENAT (2019). Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/49c9e3d3-ed8e-4a93-95ac-76dd53790299.pdf> Acessado em: 16/03/2021.
- Confederação Nacional do Transporte (CNT). Pesquisa CNT de Rodovias 2022: Relatório Gerencial – Brasília: CNT: SET: SENAT (2022). Disponível em: <https://pesquisarodovias.cnt.org.br/conteudo> Acessado em: 31/03/2023.
- Costa, T. C. F.; Campos, D. J. F.; Albuquerque, B. C. P.; Oliveira, K. S. C.; Perim, L. R.; Hoffmann, I. C. S; Resende, C. R. L. P. O Uso de Geotecnologias na Atualização

- da Malha Rodoviária Federal Estratégica no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Balneário Camboriú/SC. Novembro de 2019.
- Crepani, E.; Medeiros, J. S.; Azevedo, L. G.; Filho, P. H.; Florenzano, T. G.; Duarte, V.; Barbosa, C. C. F. Sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento ecológico-econômico. São José dos Campos: INPE, 2001.
- Cruz, D. G.; Nogueira, F. C.; Rossi, D. Q.; Pereira, T. G.; Ferreira, R. F. Análise Fatorial Multivariada Aplicada na Caracterização de Contaminantes de um Depósito de Minério de Ferro. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, vol.15, n3, p.248-252, 2018.
- Cunha, F. F.; Leal, A. J. F.; Costa, A. S. V. Implantação de uma Estrada Não-Pavimentada na Microbacia Hidrográfica de Palmital. *RCTVM*, novembro 2011.
- Cunha, R. C. da.; Dupas, F. A.; Pons, N. A. D.; Tunsisi, J. G. Análise da influência das variáveis ambientais utilizando inferência fuzzy e zoneamento das vulnerabilidades. Estudo do caso da bacia hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos - SP. *Geociências*, São Paulo, v. 30, n. 3, p.399-414, nov. 2015.
- Dellargine, F. L.; Souza, D. S. L.; Mira, I. R. C.; S, G. T. G.; Silva, M. L. Análise da Vulnerabilidade Ambiental do Município de Inconfidentes – MG. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.13, n.07, 2020.
- Dias, N. O.; Figueirôa, C. F. B. Potencialidades do Uso de Geotecnologias para a Gestão e Planejamento de Unidades de Conservação. *Revista de Geografia, PPGeo - UFJF*. V. 10, nº 2, 2020.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-PRO 011/79. Avaliação Estrutural dos Pavimentos Flexíveis. 1979.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-PRO 164/94. Calibração e Controle de Sistemas Medidores de Irregularidade de Superfície de Pavimento (Sistema Integradores IPR/USP e Maysmeter). 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-PRO 182/94. Medição da Irregularidade de Superfície de Pavimento com Sistemas Integradores IPR/USP e Maysmeter. 1994.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. DNER-PRO 273/96. Determinação de Deflexões Utilizando Deflectômetro de Impacto Tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)”. 1996.
- DNER. Departamento Nacional de Estradas e Rodagem. NORMA DNIT 005/2003 - TER. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semi-rígidos Terminologia. 2003.

- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR – 719. Manual de Pavimentação - 3. ed. - Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR – 720. Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR - 724. Manual de Drenagem de Rodovias - 2. ed. - Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR – 723. Manual de Estudos de Tráfego - Rio de Janeiro, 2006.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Publicação IPR – 745. Manual de Gerência de Pavimentos - Rio de Janeiro, 2011.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. NORMA DNIT 008/2003 - PRO. Levantamento Visual Contínuo para Avaliação da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. NORMA DNIT 006/2003 - PRO. Avaliação Objetiva da Superfície de Pavimentos Flexíveis e Semi-rígidos - Procedimento. Rio de Janeiro, 2003.
- DNIT. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. NORMA DNIT 132/2010 - PRO. Pavimentos – Calibração da Célula de Carga e de Sensores de Deflexão dos Deflectômetros do Tipo “Falling Weight Deflectometer (FWD)” - Procedimento. Rio de Janeiro, 2010.
- Dong, Q.; Chen, X.; Dong, S.; Zhang, J. Classification of Pavement Climatic Regions Through Unsupervised and Supervised Machine Learnings. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2021.
- Elmiro, M. A. T. Correção de Modelos Digitais de Elevação Insar Através de Superfícies de Ajustes Geradas por Métodos de Interpolação Espacial. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Computação Aplicada. INPE, São José dos campos, 2008.

- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Zoneamento Geológico e Geomorfológico entre Feijó e Mâncio Lima – Acre. Centro de Pesquisa Agroflorestal do Acre. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Documentos 99. Rio Branco, AC, 2005.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (2018). Disponível em: <https://www.embrapa.br/solos/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1094003/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos>. Acessado em 03/08/2021.
- EMBRAPA. Solos Tropicais. Ageitec - Agência Embrapa de Informação Tecnológica (2013). Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/Abertura.html. Acessado em: 03/08/2021.
- Faria, A. L. L.; Silva, J. X.; Goes, M. H. B. Análise Ambiental por Geoprocessamento em Áreas com Susceptibilidade à Erosão do Solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Espírito Santo, Juiz de Fora (MG). Revista Caminhos de Geografia 4(9) 50-65, jun. 2003.
- Ferreira, N. C. Apostila de Sistema de Informações Geográficas (2006). Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado de Goiás. Disponível em: http://www.faed.udesc.br/arquivos/id_submenu/1414/apostila_sig.pdf. Acessado em: 06/07/2021.
- Figueirêdo, M. C. B.; Vieira, V. P. P. B.; Mota, S.; Rosa, M. F.; Miranda, S. Análise da Vulnerabilidade Ambiental. Fortaleza: Embrapa, 2010.
- Filho, B. C.; Polivanov, H.; Junior, W. C.; Chagas, C. S.; Calderano, S. B. Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Regiões Tropicais Montanhosas com Suporte de SIG. Revista de Geografia (Recife) V. 35, Nº. 3, 2018.
- Francisco, P. R. M.; Pereira, F. C.; Ziany Neiva Brandão, Z. N.; Zonta, J. H.; Santos, D.; Silva, J. V. N. Mapeamento da aptidão edáfica para fruticultura segundo o zoneamento agropecuário do Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, vol.08, n.02, 377-390. 2015.
- Franco, G. B.; Silva, D. D.; Marques, E. A. G.; Chagas, R. L. G. Análise da Vulnerabilidade à Contaminação do Aquífero Freático e da Taxa de Infiltração do Solo da Bacia do Rio Almada e Área Costeira Adjacente – BA. Revista Brasileira de Geografia Física v.08, n.03, 2015.
- Freitas, W. R. A.; Filho, M. F. L.; Silva, V. L.; Agostinho, S. A.; Piovesan, E. K. Geologia da Porção Centro-Leste da Bacia São José do Belmonte, Pernambuco, NE do Brasil. Estudos Geológicos Vol. 28 (1) 2018.

- Friel, C. Notes on Factor Analysis. Criminal Justice Centre, Sam Houston State University, 2009.
- Furrier, M.; Araújo, M. E.; Meneses, L. F. Geomorfologia e Tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. Revista do Instituto de Geociências – USP. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 61-70, outubro 2006.
- Fushimi, M. Vulnerabilidade Ambiental aos Processos Erosivos Lineares de Parte dos Municípios de Marabá Paulista-SP e Presidente Epitácio-SP. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia. Presidente Prudente/SP, 2016.
- G1/PB. Paraíba já Desmatou 90% da Mata Atlântica de seu Território, diz IBGE (2015). Disponível em: <<http://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2015/06/paraiba-ja-desmatou-90-da-mata-atlantica-de-seu-territorio-diz-ibge.html>>. Acessado em: 28/05/2021.
- G1/PB. Projeto Recupera Florestas Nativas da Mata Atlântica na Paraíba (2020). Disponível em: <<https://g1.globo.com/pb/paraiba/noticia/2021/05/27/projeto-recupera-florestas-nativas-da-mata-atlantica-na-paraiba.ghtml>>. Acessado em: 28/05/2021.
- Garcia, A. C. S. M.; Andrade, L. C.; Cruz, A. F. S.; Moura, A. E. S. S.; Santos, P. R. Vulnerabilidade Ambiental em Áreas de Caatingas na Unidade de Conservação Parna do Catimbau, Pernambuco, Semiárido Brasileiro. Revista Holos Environment, v. 20 n. 4, 2020.
- Gonçalves, F. J. P. Estudo do Desempenho de Pavimentos Flexíveis a partir de Instrumentação e Ensaio Acelerados. Porto Alegre: UFRGS, 2002. Tese Doutorado.
- Gonçalves, F. P. O Diagnóstico e a Manutenção dos Pavimentos (Notas de aula) (1999). Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~pugliero/arquivos/10.pdf>. Acessado em: 26/06/2021.
- Grigio, A. M. Aplicação de Sensoriamento Remoto e Sistema de Informação Geográfica na Determinação da Vulnerabilidade Natural e Ambiental do Município de Guimarães (RN): Simulação de Risco às Atividades da Indústria Petrolífera. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica - UFRN, 2003.
- Gunderson, L. H. Ecological Resiliense – in Theory and Application. Annual Review of Ecology and Systematics. Vol. 31, p. 425-439, 2000.
- Hair, Jr; Black, W. C; Babin, B. J; Anderson, R. E e Tatham, R. L. Multivariate Data Analysis. 6ª edição. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall, 2006.

- Hair, Jr; Black, W. C; Babin, B. J; Anderson, R. E e Tatham, R. L. Análise Multivariada de Dados. Tradução Adonai Schlup Sant'Anna. 6ª edição. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- IBAMA. Plano de manejo florestal para a região do Seridó do Rio Grande do Norte. Natal: IBAMA, v.1. (Projeto PNUD/FAO/IBAMA). 1994.
- IBGE. Mapa de Clima do Brasil (2002). Disponível em: <https://atlascolar.ibge.gov.br/images/atlas/mapas_brasil/brasil_clima.pdf>. Acessado em: 24/05/2021.
- Kaliski, A. D.; Ferrer, T. R.; Lahm, R. A. Análise Temporal do Uso do Solo Através de Ferramentas de Geoprocessamento - Estudo de Caso: Município de Butiá/RS. Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFRGS. ISSN 1982-0003. V. 4, n. 2, 2010.
- Lages, G. A.; Brasilino, R. G.; Miranda, A. W. A.; Marinho, M. S.; Medeiros, V. C. Caracterização Geoquímica dos Ortognaisses do Complexo Cabaceiras (CCB), no Domínio Alto Moxotó, NE do Brasil. RIGeo - Repositório Institucional de Geociências – CPRM (2009). Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/895/1/evento_lages3.pdf. Acessado em: 20/07/2021.
- Lopes, P. M. Alterabilidade e Comportamento Geomecânico de Rochas no AHE Simplício. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019a.
- Lopes, T. A. S. Análise do Efeito da Sazonalidade da Temperatura e do Tráfego no Desempenho de Pavimentos Flexíveis: Segmentos Monitorados de Araranguá-SC. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2019b.
- Maia, R. P.; Bezerra, F. H. R. Neotectônica, geomorfologia e sistemas fluviais: uma análise preliminar do contexto nordestino. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 12, n. 3, p. 37-46, 2011.
- Manoel, J. L. Vulnerabilidade Ambiental do Município de Maringá – PR: Subsídios à Geomorfologia Geográfica. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista. Campus de Presidente Prudente/SP, 2018.
- Matos, D. A. S; Rodrigues, E. C. Análise Fatorial. Brasília – DF. Enap 2019.
- Medeiros, G. F.; Castro, A. S.; Rodrigues, R. J. R.; Resplandes, J. M.; Almeida, J. G. R. Fatores Geomorfológicos na Contribuição de Ocorrência de Processos Erosivos as

- Margens da Rodovia TO-445, Município de Miracema-TO. Revista de Geociências do Nordeste - Northeast Geosciences Journal, v. 6, nº 2, 2020.
- Mello, Y. R.; Silveira, C. T. Análise de Modelos Digitais de Elevação e Geração de Atributos Topográficos para a Região da Serra do Mar do Estado de Santa Catarina. Revista Brasileira de Geografia Física v.11, n.06, 2018.
- Melo, R. T. S. Influência das Condições de Ensaio na Avaliação da Sensibilidade à Água de Misturas Betuminosas. Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho - Escola de Engenharia. Julho de 2017.
- Mendes, S. C.; Ribeiro, V. O.; Filho, A. C. P.; Galbetti, T. A. S. Álgebra de Mapas na Elaboração de Carta de Risco à Inundação. Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ. Vol. 43 - p. 349-362, 2020.
- Mendonça, G. C.; Costa, R. C. A.; Parras, R.; Oliveira, L. C. M.; Abdo, M. T. V. N.; Pecheco, F. A. L.; Pissarra, T. C. T. Spatial indicator of priority areas for the implementation of agroforestry systems: An optimization strategy for agricultural landscapes restoration. Science of the Total Environment 839, 2022.
- Nakamura, L. R.; Filho, A. A. C.; Oliveira, E. C.; Firetti, R. Utilização da Análise Fatorial para Orientar a Criação de Políticas Públicas na Área do Trabalho, nas Regiões Administrativas de Araçatuba, Presidente Prudente e Marília. 19º SINAPE - Hotel Fazenda Fonte Colina Verde, São Pedro-SP. 26 a 30 de julho de 2010.
- Nascimento, C. A. O.; Guardani, R.; Análise Estatística Multivariada Aplicada a Processos Químicos (2007). Disponível em: http://www.nupeg.ufrn.br/downloads/Estatistica_Aplicada_Processos/Aula-2-Covar-Outliers-100807.pdf. Acessado em: 12/08/2021.
- Neto, A. C. CE-704 Análise Multivariada Aplicada à Pesquisa (2010). Disponível em: https://docs.ufpr.br/~soniaisoldi/ce090/CE076AM_2010.pdf. Acessado em: 12/07/2021.
- Neto, R. X. M. Temperatura da superfície nos Materiais de Pavimentação: Uma Contribuição ao Desenvolvimento Urbano. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Urbano. Recife, 2015.
- Neuman, G.; Silveira, T.; Sampaio, T. V. M. Análise da Influência da Escala na Obtenção dos Atributos Topográficos Derivados de MDE. RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise. Temático de Geotecnologias, Curitiba, v.43, p. 179 -199, Fev/2018.
- Nishizima, M. L. Vulnerabilidade Ambiental à Processos Erosivos Lineares no Setor Centro-Sul do Município de Mirante do Paranapanema - SP. Dissertação de

- Mestrado. Universidade Estadual Paulista (UNESP). Programa de Pós-Graduação em Geografia. Presidente Prudente/SP, 2021.
- Nörnberg, S. O.; Rehbein, M. O. Fragilidade Ambiental e Vulnerabilidade à Perda de Solos no Município de Pelotas/RS: Aplicação e Comparação de Modelos. *Revista Caminhos de Geografia*, Uberlândia-MG - v. 22, n. 81, p. 42–59, jun./2021.
- Nunes, H. K. B.; Aquino, C. M. S. Vulnerabilidade Ambiental dos Setores Censitários às Margens do Rio Poti no Município de Teresina (Piauí). *Revista Brasileira de Geografia Física* v.11, n.06, 2018.
- Oliveira, A. F. Decifrando a Ferramenta Slope com Arquivo Raster no ArcGIS (2017). Disponível em: <https://mundogeo.com/2017/07/26/artigo-decifrando-a-ferramenta-slope-com-arquivo-raster-mde-no-arcgis/>. Acessado em: 09/06/2021.
- Pallant, J. SPSS Survival Manual. Open University Press, 2007.
- Passos, B. C.; Marques, J. A. F.; Andrade, C. R. B.; Yulita, E. G.; Baía, J. F. B. Análise do CBR de Sub-Base Argilosa Estabilizada Granulometricamente com Material Granular e Resíduos de Pavimentos (2018). Disponível em: https://www.confex.org.br/sites/default/files/antigos/contecc2018/civil/31_adcdsaegcmgerdp.pdf. Acessado em: 10/06/2021.
- Patil, V. H.; Singh, S. N.; Mishra, S.; Donavan, D. T. Efficient Theory Development and Factor Retention Criteria: Abandon the Eigenvalue Greater than One Criterion. *Journal of Business Research*, 61(2), 162-170. 2008.
- PBMC. Contribuição do Grupo de Trabalho 2 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo do GT2. PBMC, Brasília, DF. 28 p. 2013.
- Pedrosa, A. S. A Geomorfologia Perante a Ciência Geográfica: Algumas Reflexões (2014). Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/mYbydSS5Jn3W6Zr9RLHmfWw/?lang=pt&format=pdf>. Acessado em: 01/06/2021.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L. & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*. 11(4), 1633-1644, 2007.
- Pereira, A. C. O. Influência da Drenagem Subsuperficial no Desempenho de Pavimentos Asfálticos. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica – USP. São Paulo: USP, 2003.
- Pereira, A. S.; Paludo, B.; Vieira, M.; Cerbaro, R. H. Apostila Análise Fatorial (2019). Disponível em: https://www.upf.br/_uploads/Conteudo/cepeac/textos-discussao/texto-02-2019.pdf. Acessado em: 12/08/2021.

- Pereira, I. M.; Andrade, L. A.; Barbosa, M. R. V.; Sampaio, E. V. S. B. Regeneração natural em um remanescente de Caatinga sob diferentes níveis de perturbação, no agreste paraibano. *Acta Botanica Brasilica* 15: 413-426. 2001.
- Pereira, P. B. Estado do Conhecimento: Metodologias para Aplicabilidade das Geotecnologias nos estudos Geoambientais. *Geografia: Publicações Avulsas*. Universidade Federal do Piauí, Teresina, v.1, n. 1, p. 125-145, jul./dez. 2019.
- Pessoa, F. H. C. Avaliações Funcional e Estrutural de Trechos de Rodovias no Distrito Federal Construídos com Diferentes Materiais. Tese de Doutorado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Universidade de Brasília/DF. Julho de 2012.
- Pizani, F. M. C.; Azevedo, U. R.; Souza, F. E. V. Geotecnologias Aplicadas ao Mapeamento da Vulnerabilidade Ambiental: Estudo de Caso do Município de Rio Acima/MG. XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. I Congresso Nacional de Geografia Física. Campinas/SP, 2017.
- Prado, D. E. As caatingas da América do Sul. In: LEAL, I. R.; TABARELLI, M.; SILVA, J. M. C. *Ecologia e Conservação da Caatinga*. Recife: UFPE, 2003.
- Programa Geologia do Brasil. Relatório Técnico – Etapa Final. Contrato 060/PR/08-CPRM/UFPE/FADE. Ministério das Minas e Energia. Recife, Julho de 2014.
- Resumo Executivo 2010 – 2020. Plano Territorial de Desenvolvimento Rural Sustentável – PTDRS. Território da Zona da Mata Sul – PB. Paraíba – 2010.
- Ribeiro, F. L.; Campos, S. Vulnerabilidade à Erosão do Solo da Região do Alto Rio Pardo, Pardinho, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, UAEAg/UFCG. v.11, n.6, p.628–636, 2007.
- Rodrigues, S. Nova Etapa na Despoluição da Bacia da Guanabara. *BIO – Revista Brasileira de Saneamento e Meio Ambiente*, n. 18, p. 42-43., 2001.
- Rodriguez, J. M. M; Silva, E.V.; Cavalcanti, A. P. B. *Geocologia das Paisagens: uma Visão Geossistêmica da Análise Ambiental*. Fortaleza: Editora UFC, 2004.
- Romero, C. W. S.; Silva, H. R.; Marques, A. P.; Oliveira, P. B. P. Relação entre as Ilhas de Calor e Uso e Ocupação do Solo em Centros Urbanos de Pequeno Porte Utilizando o Sensoriamento Remoto. *Anais do XVIII Simpósio de Sensoriamento Remoto – SBSR*. ISBN: 978-85-17-00088-1. Santos/SP, 2017.
- Ross, J. L. S. Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados. *Rev. do Departamento de Geografia – FFLCH-USP, São Paulo*, v. 8, p. 63-74, 1994.
- Rudorff, B. F. T. *Produtos de Sensoriamento Remoto (2006)*. Disponível em: <http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/>. Acessado em: 22/06/2021.

- Saaty, T. L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 32, 1986.
- Saito, S. M. Desastres Naturais e Geotecnologias: Vulnerabilidade. INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Caderno Didático nº 6. Santa Maria, 2011.
- Sambuichi, R. H. R.; Oliveira, M. A. C.; Silva, A. P. M.; Lurdemann, G. A Sustentabilidade Ambiental da Agropecuária Brasileira: Impactos, Políticas Públicas e Desafios. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA 2012.
- Santana, D. P. Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, Documentos 30, 2003.
- Santos, E. J.; Nutman, A. P.; Neves, B. B. B. Idades SHRIMP U-Pb do Complexo Sertânia: Implicações Sobre a Evolução Tectônica da Zona Transversal, Província Borborema. *Revista do Instituto de Geociências – USP*. São Paulo, v. 4, n. 1, p. 1-12, abril 2004.
- Santos, K. A.; Rufino, I. A. A.; Filho, M. N. M. B. Impactos da Ocupação Urbana na Permeabilidade do Solo: O Caso de uma Área de Urbanização Consolidada em Campina Grande - PB. *Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFRGS*. Artigo Técnico - *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2017.
- Santos, K. S.; Silva, M. T.; Oliveira, A. B.; Serrão, E. A. O. Vulnerabilidade Socioeconômica no Estado do Rio Grande do Norte a partir de Técnicas Multivariadas. *Anuário do Instituto de Geociências*. UFRJ, v. 44, 36049, 2021.
- Santos, R. F. Vulnerabilidade Ambiental: Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?. Ministério do Meio Ambiente. Brasília: MMA, 2007.
- Schäfer, A. G. Aplicação de Produtos Fotogramétricos e do Sensor Laser Scanner em Projetos Rodoviários – Estudo de Caso: Trecho da SC-414. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - PPGEC. Florianópolis, 2004.
- Siche, R.; Agostinho, F.; Ortega, E.; Romeiro, A. Índices Versus Indicadores: Precisões Conceituais na Discussão da Sustentabilidade de Países. *Rev. Ambiente & Sociedade*. Campinas v. X, n. 2 / p. 137-148, 2007.
- Silva, A. P. M.; Mesquita, V. V.; Ferreira, N. C. Grids Inspection: Uma Ferramenta Destinada à Inspeção Visual de Grids em Séries Históricas de Imagens de Sensoriamento Remoto. *Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Santos/SP, abril 2019a.
- Silva, D. G.; Melo, R. F. T.; Corrêa, A. C. B. Influência da Densidade de Drenagem na Interpretação da Evolução Geomorfológica do Complexo de Tanques do Município

- de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco, Nordeste do Brasil. Revista de Geografia. Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 26, n. 3, jun/ago. 2009.
- Silva, G. F.; Santos, D.; Silva, A. P.; Souza, J. M. Indicadores de Qualidade do Solo Sob Diferentes Sistemas de Uso na Mesorregião do Agreste Paraibano. Rev. Caatinga vol.28 nº.3 Mossoró July/Sept. 2015.
- Silva, M. G.; Silva, A. B. N.; Pontes, A. N.; Morales, G. P. Caracterização da Vulnerabilidade Ambiental da Reserva Biológica Nascentes da Serra do Cachimbo, Estado do Pará. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.16 n.29; p.464, 2019b.
- Silva, M. T. Mudança no Uso de Solo e no Aporte de Sedimentos na Bacia Hidrográfica do Submédio Rio São Francisco. Campina Grande: UFCG. 122p. Tese de Doutorado. 2014.
- Silva, M. V. C.; Crispim, A. B. Geologia Geral. Fortaleza: EdUECE, 2019.
- Silveira, C. T.; Fiori, A. P.; Oka-Fiori, C. Estudo das Unidades Ecodinâmicas de Instabilidade Potencial na Apa de Guaratuba: Subsídios para o Planejamento Ambiental. Boletim Paranaense de Geociências, n. 57, p. 9-23. Editora UFPR, 2005.
- Silveira, C. T.; Oka-Fiori, C.; Fiori, A. P.; Zai, C. Mapeamento de Declividade de Vertentes: Aplicação na APA de Guaratuba / Paraná (2006). Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/10/432.pdf>. Acessado em: 09/06/2021.
- Simões, A. R. B. Os Pavimentos Rodoviários em Cenários de Alterações Climáticas: Retenção de Partículas na Superfície de Misturas Betuminosas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa. Maio de 2016.
- Slodkowski, L.; Battisti, I.; Moura, B.; Leobett, J.; Parreira, M. Capacitação em análise estatística de dados com uso do software livre R. Revista Ciência em Extensão, v. 14, n. 3, 2019.
- Sokoloski, L. J. F.; Ferreira, M. R. A.; Viterbo, G. A.; Belotti, F. M.; Vieira, E. M. Estudo da Vulnerabilidade Natural da Sub-bacia do Rio Piracicaba/MG Utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.2, p.211-222, 2019.
- Souza, J. A. P.; Menim, B. F.; Kowalski, L. F. Influência do Albedo na Temperatura de Superfície de Pavimento Asfáltico Urbano. Revista Tecnologia e Ambiente, v. 26, Criciúma, Santa Catarina/SC 2020.

- Souza, T. P.; Otto, G. G.; Almeida, A. J.; Souza, R. A.; Mori, F.; Valente, A. M. Efeito da Condição Climática na Temperatura de Pavimento de Concreto Asfáltico Espesso. 33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET. Balneário Camboriú/SC, 2019.
- Tabachnick, B.; Fidell, L. Using Multivariate Analysis. Needham Heights: Allyn & Bacon, 2007.
- Tagliani, C. R. A. Técnica para Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de Ambientes Costeiros Utilizando um Sistema Geográfico de Informação. Seminário Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11. Belo Horizonte. Anais. São José dos Campos: INPE. p. 1657-1664, 2003.
- Teixeira, I. Estabilização de um Solo Laterítico Argiloso para Utilização como Camada de Pavimento. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp. Campinas, 2014.
- Teixeira, M. R. A Utilização do Geoprocessamento na Análise Ambiental e sua Importância na Tomada de Decisões: Um Estudo sobre o Uso do Geoprocessamento em Pesquisas sobre Ocupação Desordenada do Solo. Dissertação de Mestrado. Curso de Engenharia Ambiental, Centro Universitário de Brasília - UniCEUB, 2015.
- Teotia, H. S.; Ribeiro, G. N.; Ramos, F. A. Integração de Sensoriamento Remoto e SIG (Geoprocessamento) na Identificação dos Solos Principais e Estratos de Vegetação para Planejamento Regional no Estado da Paraíba. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio, INPE p. 9128. 2011.
- Tomlin, D. Geographic Information Systems and Cartographic Modeling. Prentice Hall, New York, 1990.
- Tôsto, S. G.; Rodrigues, C. A. G.; Bolfe, E. L.; Batistella, M. Geotecnologias e Geoinformação: O Produtor Pergunta, a Embrapa Responde. Embrapa. Brasília, DF, 2014.
- Tricart, J. Ecodinâmica. Rio de Janeiro, FIBGE/SUPREN. 1977.
- Turner, B. L.; Kasperson, R. E.; Matsone, P. A.; McCarthy, J. J.; Corell, R. W.; Christensen, L.; Eckley, N.; Kasperson, J. X.; Luerse, A.; Martello, M. L.; Polsky, C.; Pulsipher, A.; Schiller, A. A framework for Vulnerability Analysis in Sustainability science. Proceedings of the National Academy of Sciences. Vol. 100, nº 14, p. 8074-8079, 2003.
- Valadares, A. A. Análise da Dinâmica do Uso e Cobertura do Solo sobre a Vulnerabilidade Ambiental em Área do Distrito Federal. Dissertação de Mestrado em Tecnologia

- Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2017.
- Valeriano, M. M. Topodata: Guia para Utilização de Dados. São José dos Campos. INPE, 2008.
- Valeriano, M. M.; Picini, A. G. Geoprocessamento de Informações Agroclimatológicas. São José dos Campos. INPE, 2003.
- Vargas, G. A. B.; Aragão, F. T. S. Simulação do Comportamento Mecânico de Pavimentos Asfálticos Instrumentados Submetidos a Diferentes Condições de Saturação. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Civil UFRJ/COPPE. Rio de Janeiro, 2018.
- Viana, H. M. F. Notas de aulas de Pavimentação (parte 8): Estudo das camadas do pavimento e subleito (2015). Disponível em: <https://engftc.files.wordpress.com/2015/11/notas-de-aula-ii-unidade.pdf>. Acessado em: 25/06/2021.
- Vicini, L. Análise Multivariada da Teoria à Prática. Santa Maria: UFSM, CCNE, 2005.
- Viola, F.; Celauro, C. Effect of Climate Change on Asphalt Binder Selection for Road Construction in Italy. Elsevier. Transportation Research Part D 37, 40–47 (2015).
- Wang, T.; Ma, X.; Li, H.; Dong, Z. Analysis Methodology and Assessment Indices of Vulnerability for Asphalt Pavement in Cold Regions. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 2:11, 2021.
- Wang, W.; Wang, L.; Miao, Y.; Cheng, C.; Chen, S. A Survey on the Influence of Intense Rainfall Induced by Climate Warming on Operation Safety and Service Life of Urban Asphalt Pavement. Journal of Infrastructure Preservation and Resilience, 1:4 (2020).
- Zanella, M. E.; Olímpio, J. L.; Costa, M. C. L.; Dantas, E. W. C. Vulnerabilidade Socioambiental do Baixo Curso da Bacia Hidrográfica do Rio Cocó, Fortaleza-CE. Soc. & Nat., Uberlândia, v. 25, n. 2, p. 317–331. Ago. 2013.

ANEXOS

ANEXO I

Nº	Município	Região	Latitude	Longitude	Máxima Mensal (mm)
5	Caldas Brandão	Agreste	-7,1025	-35,3244	397,7
6	Campina Grande/EMBRAPA	Agreste	-7,2256	-35,9042	361,5
7	Campina Grande/INSA	Agreste	-7,2769	-35,9652	271,0
8	Campina Grande/Santa Terezinha	Agreste	-7,2561	-35,8303	295,7
9	Campina Grande/Sao Jose da Mata	Agreste	-7,1897	-35,9844	290,5
10	Campina Grande/Sítio Aeude de Dentro	Agreste	-7,3386	-36,0842	299,9
11	Campina Grande/Sítio Massapê de Galante	Agreste	-7,3131	-35,8419	398,6
16	Fagundes	Agreste	-7,3586	-35,7844	394,0
19	Gurinhem	Agreste	-7,1261	-35,425	508,1
20	Ingá	Agreste	-7,2925	-35,6119	370,0
21	Itabaiana	Agreste	-7,325	-35,3375	379,3
22	Itatuba	Agreste	-7,3778	-35,6297	330,1
23	Juarez Tavora	Agreste	-7,1628	-35,5931	378,7
24	Juripiranga	Agreste	-7,3717	-35,2408	361,0
25	Lagoa Seca	Agreste	-7,1556	-35,8572	509,2
26	Lagoa Seca/EMEPA	Agreste	-7,1572	-35,8817	338,6
27	Massaranduba	Agreste	-7,1808	-35,7344	410,8
28	Mogeiro	Agreste	-7,3075	-35,4764	409,2
31	Pilar	Agreste	-7,2675	-35,2608	401,2
32	Puxinanã	Agreste	-7,1472	-35,9594	317,1
33	Queimadas	Agreste	-7,3606	-35,8897	357,2
36	Riachão do Bacamarte	Agreste	-7,2472	-35,6631	294,8
37	Riachão do Poço	Agreste	-7,1493	-35,2634	335,4
38	Salgado de São Félix	Agreste	-7,3558	-35,4344	376,3
39	São José dos Ramos	Agreste	-7,2475	-35,3728	378,2
40	São Miguel de Taipu	Agreste	-7,245806	-35,205806	431,0
42	Serra Redonda	Agreste	-7,1861	-35,6797	413,5
43	Sobrado	Agreste	-7,146111	-35,235917	445,0
114	Mari	Brejo	-7,0536	-35,32	359,8
121	Sapé	Brejo	-7,0925	-35,2233	429,8
134	Boa Vista	Cariri/Curimatã	-7,2575	-36,2375	263,8
191	Bayeux	Litoral	-7,1336	-34,9383	540,6
193	Cabedelo/CAGEPA	Litoral	-6,9714	-34,8325	760,8
194	Cabedelo/EMATER	Litoral	-7,0878	-34,85	651,4
195	Conde	Litoral	-7,2533	-34,9217	637,6
196	Conde/Açude Gramame Mamuaba	Litoral	-7,253167	-34,9297	557,6
197	Cruz do Espírito Santo	Litoral	-7,1408	-35,0911	439,5
198	João Pessoa/CEDRES	Litoral	-7,2171	-34,9496	596,3
199	João Pessoa/DFAARA	Litoral	-7,0833	-34,8333	786,9
200	João Pessoa/Mangabeira	Litoral	-7,1972	-34,8131	665,4
201	João Pessoa/Mares	Litoral	-7,1558	-34,9089	599,7
202	Lucena	Litoral	-6,8933	-34,8825	606,3
214	Santa Rita	Litoral	-7,1406	-34,9828	507,0
215	Santa Rita/Indaiá	Litoral	-7,2246	-35,0319	488,3

ANEXO II

IGG obtido para o segmento homogêneo 1 (SH1)

Item	Natureza do defeito	Frequência		FP	IGI
		Absoluta considerada	Relativa (%)		
1	FC-1 (FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	0	0,00	0,20	0,00
2	FC-2 (J, TB)	10	3,08	0,50	1,54
3	FC-3 (JE, TBE)	45	13,85	0,80	11,08
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0	0,00	0,90	0,00
5	O, P, E	1	0,31	1,00	0,31
6	EX	0	0,00	0,50	0,00
7	D	41	12,62	0,30	3,78
8	R	59	18,15	0,60	10,89
9	Média aritmética das TRI e TRE		F (mm) 2,26	1A (X) 1B ()	2,71
10	Média aritmética das variâncias		FV (mm) 1,14	2A (X) 2B ()	1,13
Nº total de estações		Índice de Gravidade Global (IGG)		Conceito:	
325		32		BOM	
1A) IGI = F x 4/3 quando F ≤ 30			2A) IGI = FV quando FV ≤ 50		
1B) IGI = 40 quando F > 30			2B) IGI = 50 quando FV > 50		

IGG obtido para o segmento homogêneo 2 (SH2)

Item	Natureza do defeito	Frequência		FP	IGI
		Absoluta considerada	Relativa (%)		
1	FC-1 (FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	0	0,00	0,20	0,00
2	FC-2 (J, TB)	0	0,00	0,50	1,54
3	FC-3 (JE, TBE)	172	96,09	0,80	11,08
4	ALP, ATP, ALC, ATC	1	0,56	0,90	0,00
5	O, P, E	77	43,02	1,00	0,31
6	EX	0	0,00	0,50	0,00
7	D	139	77,65	0,30	3,78
8	R	132	73,74	0,60	10,89
9	Média aritmética das TRI e TRE		F (mm) 5,05	1A (X) 1B ()	10,11
10	Média aritmética das variâncias		FV (mm) 3,92	2A (X) 2B ()	3,92
Nº total de estações		Índice de Gravidade Global (IGG)		Conceito:	
179		202		PÉSSIMO	
1A) IGI = F x 4/3 quando F ≤ 30			2A) IGI = FV quando FV ≤ 50		
1B) IGI = 40 quando F > 30			2B) IGI = 50 quando FV > 50		

IGG obtido para o segmento homogêneo 3 (SH3)

Item	Natureza do defeito	Frequência		FP	IGI
		Absoluta considerada	Relativa (%)		
1	FC-1 (FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	0	0,00	0,20	0,00
2	FC-2 (J, TB)	58	20,71	0,50	1,54
3	FC-3 (JE, TBE)	222	79,29	0,80	11,08
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0	0,00	0,90	0,00
5	O, P, E	0	0,00	1,00	0,31
6	EX	6	2,14	0,50	0,00
7	D	21	7,50	0,30	3,78
8	R	190	67,86	0,60	10,89
9	Média aritmética das TRI e TRE		F (mm) 5,66	1A (X) 1B ()	7,54
10	Média aritmética das variâncias		FV (mm) 3,58	2A (X) 2B ()	3,58
Nº total de estações		Índice de Gravidade Global (IGG)		Conceito:	
560		129		RUIM	
1A) IGI = $F \times 4/3$ quando $F \leq 30$			2A) IGI = FV quando $FV \leq 50$		
1B) IGI = 40 quando $F > 30$			2B) IGI = 50 quando $FV > 50$		

IGG obtido para o segmento homogêneo 4 (SH4)

Item	Natureza do defeito	Frequência		FP	IGI
		Absoluta considerada	Relativa (%)		
1	FC-1 (FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	0	0,00	0,20	0,00
2	FC-2 (J, TB)	16	10,13	0,50	1,54
3	FC-3 (JE, TBE)	142	89,87	0,80	11,08
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0	0,00	0,90	0,00
5	O, P, E	1	0,63	1,00	0,31
6	EX	4	2,53	0,50	0,00
7	D	32	20,25	0,30	3,78
8	R	82	51,90	0,60	10,89
9	Média aritmética das TRI e TRE		F (mm) 4,20	1A (X) 1B ()	5,60
10	Média aritmética das variâncias		FV (mm) 2,06	2A (X) 2B ()	2,06
Nº total de estações		Índice de Gravidade Global (IGG)		Conceito:	
316		124		RUIM	
1A) IGI = $F \times 4/3$ quando $F \leq 30$			2A) IGI = FV quando $FV \leq 50$		
1B) IGI = 40 quando $F > 30$			2B) IGI = 50 quando $FV > 50$		

IGG obtido para o segmento homogêneo 5 (SH5)

Item	Natureza do defeito	Frequência		FP	IGI
		Absoluta considerada	Relativa (%)		
1	FC-1 (FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRR)	0	0,00	0,20	0,00
2	FC-2 (J, TB)	2	1,32	0,50	1,54
3	FC-3 (JE, TBE)	149	98,68	0,80	11,08
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0	0,00	0,90	0,00
5	O, P, E	0	0,00	1,00	0,31
6	EX	2	1,32	0,50	0,00
7	D	10	6,62	0,30	3,78
8	R	102	67,55	0,60	10,89
9	Média aritmética das TRI e TRE		F (mm) 3,13	1A (X) 1B ()	4,16
10	Média aritmética das variâncias		FV (mm) 1,49	2A (X) 2B ()	1,49
Nº total de estações		Índice de Gravidade Global (IGG)		Conceito:	
310		129		RUIM	
1A) IGI = $F \times 4/3$ quando $F \leq 30$			2A) IGI = FV quando $FV \leq 50$		
1B) IGI = 40 quando $F > 30$			2B) IGI = 50 quando $FV > 50$		