



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE GARANHUNS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS



JOÃO VITOR DE ALMEIDA BEZERRA

**GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE DO RISCO
GEOMORFOLÓGICO EM MICROBACIAS DE NASCENTES URBANAS**

Garanhuns - PE

2021

JOÃO VITOR DE ALMEIDA BEZERRA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE DO RISCO
GEOMORFOLÓGICO EM MICROBACIAS DE NASCENTES URBANAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Meio Ambiente e Tecnologias

Linha de Pesquisa: Modelagem Socioambiental e Tecnologias

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Brauer Vigoderis

Coorientadora: Prof. Dra. Josiclêda Domiciano Galvêncio

Garanhuns - PE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Ariano Suassuna, Garanhuns - PE, Brasil

B574g Bezerra, João Vitor de Almeida
Geotecnologias aplicadas na análise do risco geomorfológico
em microbacias de nascentes urbanas / João Vitor de Almeida
Bezerra. - 2021.
87 f.; il.

Orientador: Ricardo Brauer Vigoderis.

Coorientador(a): Josiclêda Domiciano Galvêncio.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de
Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Garanhuns, BR -
PE, 2021.

Inclui referências.

1. Ciências ambientais 2. Urbanização 3. Degradação
ambiental. 4. Planejamento urbano I. Vigoderis, Ricardo
Brauer, orient.II. Galvêncio, Josiclêda Domiciano, coorient.
III. Título

CDD 363.7003

JOÃO VITOR DE ALMEIDA BEZERRA

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS NA ANÁLISE DO RISCO
GEOMORFOLÓGICO EM MICROBACIAS DE NASCENTES URBANAS

Data de aprovação:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Orientador Dr. Ricardo Brauer Vigoderis

Universidade Federal Rural de Garanhuns – Unidade Acadêmica de Garanhuns.

Prof. Dr. Felipe Pessoa de Melo

Faculdade AGES de Tucano - BA.

Prof. Dra. Werônica Meira de Souza

Universidade Federal Rural de Garanhuns – Unidade Acadêmica de Garanhuns.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Ricardo Brauer Vigoderis pelos ensinamentos, paciência, amizade e orientação.

Ao meu amigo, professor e mentor Felipe Pessoa de Melo pelos ensinamentos, orientação e por sempre ter acreditado em meu potencial.

Ao meu grande amigo Pedro Henrique de Oliveira Amaral pela amizade e apoio incondicional.

A minha amiga Professora Mariana de Albuquerque Braga Alves por todos os conselhos e ajuda no meu processo de formação profissional.

Ao meu irmão Walter Winicius de Almeida Bezerra e minha tia Marluce Severina de Almeida por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuíram para a realização deste trabalho.

A minha mãe Marinalva Severina de Almeida e minha esposa Lucija Preskar pelo amor e apoio incondicional.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) cujo apoio, a partir do financiamento de bolsa de mestrado, foi essencial para a elaboração desta pesquisa.

A todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

RESUMO

A presente pesquisa teve como objetivo aplicar tecnologias ambientais e geotecnologias na análise do risco geomorfológico nas microbacias das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria localizadas no município de Garanhuns – PE. A referida região passa por um período de maximização do seu perímetro urbano, acarretando profundas modificações na paisagem local. A constante remoção da cobertura vegetal criou áreas de risco ao intensificar o escoamento superficial, enquanto o crescimento desordenado, impulsionado pela ausência de um planejamento urbano adequado, propiciou a ocupação de áreas impróprias como encostas e as adjacências de nascentes. Esse constante avanço do perímetro urbano, aliado às características geomorfológicas e o índice pluviométrico atípico no semiárido, configura um cenário de predisposição a riscos geomorfológicos como movimentos de massa e erosão. Os recursos hídricos de Garanhuns são constantemente afetados pelos processos de urbanização que provocaram contaminação e sedimentação das nascentes. Sendo assim, a pesquisa foi realizada a partir das seguintes etapas: revisão bibliográfica, coleta de dados em campo e a modelagem e análise da topografia, escoamento superficial, NDVI, estabilidade do relevo e erosão tanto da área urbana de Garanhuns como um todo quanto das microbacias das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria. A modelagem da topografia e do escoamento superficial foi realizada a partir do *software* ArcGIS, enquanto os cálculos de estabilidade do relevo, NDVI e erosão hídrica foram realizados a partir da elaboração de algoritmos na ferramenta *Model Builder* do *software* supracitado. Os resultados foram analisados em conjunto com trabalhos em campo e a partir deles foram elaboradas recomendações que se aplicadas, propiciarão a mitigação dos riscos geomorfológicos nas microbacias que conseqüentemente contribuirá para a recuperação das nascentes. A análise do NDVI de Garanhuns indicou que a média se manteve relativamente constante ao longo do tempo, porém o desvio padrão sofreu alterações bruscas, sugerindo distúrbios na distribuição do referido índice. O mesmo comportamento foi encontrado nas microbacias das nascentes Pau Amarelo e Vila Maria. Esse fenômeno da distribuição do NDVI da região é fruto da dinâmica de expansão urbana que gerou grandes áreas impermeáveis e outras com vegetação densa. O comportamento do NDVI pode servir como um indicador de que o modelo de desenvolvimento da malha urbana pode estar desconsiderando os limites da paisagem. A modelagem da estabilidade do relevo resultou em um modelado de Garanhuns que aponta as áreas com maior predisposição ao risco geomorfológico de movimentos de massa. Conforme o modelo, todas as microbacias estudadas apresentaram parcelas consideráveis de solo instável, o que põe em risco a vazão e qualidade da água das nascentes. A modelagem da erosão indicou que aproximadamente metade da área urbana de Garanhuns tem um alto potencial de erosão hídrica o que agrava a sedimentação das nascentes e impacta a estabilidade das vertentes. Por fim, constatou-se um cenário de risco geomorfológico na área de estudo e foram elaboradas recomendações pontuais que visam a mitigação desse cenário e a recuperação das microbacias estudadas.

Palavras-chave: Degradação ambiental, Planejamento urbano, Urbanização.

ABSTRACT

This research aimed to apply environmental technologies and geotechnologies in the analysis of geomorphological risk in the watersheds of the Pau Amarelo, Pau Pombo and Vila Maria springs, located in the municipality of Garanhuns-PE. The referred region is going through a period of maximization of its urban perimeter, leading to profound changes in the local landscape. The constant removal of vegetation cover created risk areas by intensifying runoff, while disorderly growth, driven by the lack of adequate urban planning, led to the occupation of improper areas, such as slopes and the adjacencies of springs. This constant advance of the urban perimeter, combined with the geomorphological characteristics and the rainfall index atypical to the Brazilian semiarid region, creates a scenario of predisposition of geomorphological risks, such as mass movements and erosion. The water resources of Garanhuns are constantly affected by the processes of urbanization that caused contamination and sedimentation of the springs. Therefore, this research was performed through the following steps: literature review, field data collection and modeling and analysis of the topography, surface runoff, NDVI, slope stability and soil erosion of both the urban area of Garanhuns as a whole and the watersheds of the Pau Amarelo, Pau Pombo and Vila Maria springs. The terrain and surface runoff modeling were carried out through the software ArcGIS, whereas the slope stability calculations, NDVI and erosion were performed through the creation of algorithm in the tool named Model Builder of the aforementioned software. The results were analyzed together with fieldwork and from them recommendations were elaborated which, if applied, will provide the mitigation of geomorphological risks in the watersheds which consequently will contribute to the environmental recovery of the springs. The NDVI analysis of Garanhuns indicated that the average values were relatively constant throughout time, however the standard deviation suffered abrupt changes, suggesting disturbances on the distribution of the referred index. The same behavior was found in the watersheds of the Pau Amarelo and Vila Maria spring. This NDVI distribution phenomenon is a product of the urban expansion dynamic that generates big impermeable areas and other areas with dense vegetation. The NDVI behavior can be used as an indicator that the development model of the urban area may be disregarding the limits of the local landscape. The slope stability modeling resulted in a model of Garanhuns that points out the areas with greater predisposition to the geomorphological risk of mass movements. According to the model, all of the studied watersheds showed considerable portions of unstable soil, which puts the flow and water quality of the springs at risk. The erosion modeling indicated that approximately half of the urban area of Garanhuns has a high potential of water erosion, which aggravates the sedimentation of the springs and impacts the stability of the slopes. Finally, a scenario of geomorphological risk was found in the study area and specific recommendations were made which aim to mitigate this scenario and recover the studied watersheds.

Keywords: Environmental degradation, Urban planning, Urbanization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquematização do modelo do talude infinito.	18
Figura 2: Localização da área de estudo.....	22
Figura 3: Médias históricas mensais de precipitação pluviométrica em Garanhuns – PE.	23
Figura 4: Fluxograma do algoritmo de estabilidade utilizando o método do talude infinito. ..	26
Figura 5: Modelado do perímetro urbano e adjacências de Garanhuns-PE.	30
Figura 6: Modelado da estabilidade do relevo de Garanhuns - PE.	31
Figura 7: Resultado da modelagem da erosão hídrica.	32
Figura 8: Ambientes fortemente instáveis, com latente ação da drenagem hídrica superficial.	34
Figura 9: População de baixa renda fixada nas bordas de vertentes fortemente instáveis.	35
Figura 10: Efeitos das ações antrópicas no Vale da Liberdade em Garanhuns – PE.	36
Figura 11: Desvio de fluxo hídrico superficial para fundo de vale com menor grau de ocupação antrópica.	37
Figura 12: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) do perímetro urbano de Garanhuns-PE.	38
Figura 13: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) em uma área de 60 metros ao redor das linhas de fluxo do perímetro urbano e adjacências de Garanhuns-PE.	39
Figura 14: Microbacia da nascente Vila Maria.	41
Figura 15: Topo do Vale da Liberdade.....	41
Figura 16: Ocupação em área de risco e práticas de agricultura no Vale da Liberdade.....	42
Figura 17: Voçoroca, canaleta desativada, lavanderia comunitária, esgoto pluvial.....	44
Figura 18: Modelado da microbacia da nascente Vila Maria e adjacências.....	45
Figura 19: Estabilidade da microbacia da nascente Vila Maria e adjacências.	46
Figura 20: Ocupação no topo da encosta, vegetação afetada por aterros, queimada da vegetação, voçoroca.....	47
Figura 21: NDVI da microbacia da nascente Vila Maria.	48
Figura 22: Cobertura vegetal na microbacia da nascente Vila Maria.....	49
Figura 23: Modelado do Vale da Liberdade e adjacências.....	52
Figura 24: Modelagem da estabilidade da microbacia da nascente Pau Amarelo e adjacências.	53
Figura 25: Vestígios de instabilidade nas encostas do Vale da Liberdade.....	54

Figura 26: Ocupações no meio da encosta leste e vestígios de demolição.	55
Figura 27: Descarte de esgoto pluvial na área de maior risco social diretamente no fundo do vale.	55
Figura 28: Ausência de dispositivos de drenagem nas ruas da encosta de maior risco social.	56
Figura 29: Acúmulo de resíduos sólidos no fundo do vale.	56
Figura 30: NDVI da microbacia da nascente Pau Amarelo.	57
Figura 31: Cobertura vegetal no topo do Vale da Liberdade.	58
Figura 32: Foto aérea do Parque Ruber van der Linden onde está localizada a nascente Pau Pombo.	59
Figura 33: Modelado da microbacia da nascente Pau Pombo e adjacências.	61
Figura 34: Modelado da microbacia da nascente Pau Pombo e adjacências.	62
Figura 35: Ocupação em área de risco na microbacia da nascente Pau Pombo.	63
Figura 36: Ocupação em área de risco na microbacia da nascente Pau Pombo.	64
Figura 37: Ocupação em área de risco na microbacia da nascente Pau Pombo.	65
Figura 38: Estrutura de contenção em ocupação na microbacia da nascente Pau Pombo.	65
Figura 39: NDVI da microbacia da nascente Pau Pombo.	66
Figura 40: Cobertura vegetal na microbacia da nascente Pau Amarelo.	67
Figura 41: Seção transversal de um talude reforçado com geossintético.	72
Figura 42: Estacas vivas.	73

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 Geral	12
2.2 Específicos	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO	13
3.1 Risco geomorfológico	13
3.2 Nascentes	14
3.3 Degradação das nascentes	15
3.4 Erosão do solo	16
3.5 Estabilidade de encostas	17
3.6 Geoprocessamento	19
3.7 Recuperação de nascentes	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1 Caracterização do local de estudo	21
4.2 Modelagem do relevo de Garanhuns	24
4.3 Modelagem da estabilidade	24
4.4 Modelagem da erosão	26
4.5 Análise do NDVI	28
4.6 Elaboração de recomendações para revitalização das nascentes	28
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
5.1 Relevo de Garanhuns	30
5.2 Análise do NDVI de Garanhuns	38
5.3 Microbacia da nascente Vila Maria	43
5.3.1 NDVI da microbacia da nascente Vila Maria	48
5.4 Microbacia da nascente Pau Amarelo	51
5.4.1 NDVI da microbacia da nascente Pau Amarelo.	57
5.5 Microbacia da nascente Pau Pombo	59
5.5.1 NDVI da microbacia da nascente Pau Pombo.	66
5.6 Recomendações para mitigação do risco geomorfológico	68
5.6.1 Saneamento básico	68
5.6.2 Microbacia da nascente Vila Maria	70
5.6.3 Microbacia da nascente Pau Amarelo	71

5.6.4 Microbacia da nascente Pau Pombo	74
6. CONCLUSÃO.....	76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

1. INTRODUÇÃO

Ações antrópicas podem acarretar desequilíbrios na paisagem natural, alterando os ecossistemas e criando impactos ambientais que eventualmente serão sentidos pela população independentemente de classe social. Conforme Miguez *et al.* (2017), o processo de urbanização modifica o ambiente natural e a consequente expansão do perímetro urbano aumenta a demanda por infraestrutura causando degradação tanto dos ambientes construídos quanto dos naturais.

As transformações antrópicas realizadas na paisagem estão cada vez mais intensas e aceleradas, existindo uma constante necessidade e demanda de novas áreas para expansão das poligonais urbanas e agrárias (MELO; SOUZA, 2016).

No Brasil, a expansão de cidades de médio porte tem aumentado significativamente desde as décadas de 80 e 90, que foi um período em que a maior parte do processo de urbanização ocorreu em grandes áreas metropolitanas como São Paulo e Rio de Janeiro. Entretanto, atualmente o movimento rural-urbano no Brasil está predominantemente afetando cidades com menos de 1 milhão de habitantes, particularmente aquelas localizadas nas regiões centro-oeste e no semiárido do Nordeste (ESPINDOLA *et al.*, 2017).

A frequente instabilidade climática na região Nordeste do Brasil, somada a outros fatores como a alta concentração de terras, caracteriza a região como sendo uma área sócio economicamente atrasada, em relação ao desenvolvimento das regiões Sul e Sudeste. Esses desníveis criam a necessidade da implementação de políticas governamentais para a solução dos problemas mais urgentes da região, principalmente os efeitos causados pelos períodos de estiagem, apontado como fator limitante ao seu desenvolvimento (BRITO *et al.*, 2017).

A expansão urbana desordenada tem causado graves problemas socioambientais, principalmente quando se refere ao curso de água localizado nos centros urbanos (SANTOS *et al.*, 2018). A conservação dos escassos recursos hídricos na região Nordeste do Brasil exige um gerenciamento mais eficiente. A má distribuição pluvial na localidade, a urbanização e as secas periódicas intensificam a demanda por água (MEIRA *et al.*, 2017).

Considerando a escassez de água no semiárido e o intenso crescimento urbano, a preservação, revitalização e monitoramento de recursos hídricos, como nascentes e suas respectivas microbacias, assim como a análise do risco geomorfológico associado à essas regiões, por meio de tecnologias ambientais e geotecnologias, são subsídios essenciais para auxiliar o desenvolvimento sustentável da região.

As nascentes são sistemas essenciais na manutenção do equilíbrio hidrológico e ambiental (FELIPPE, 2009). Nascentes consistem em um afloramento do lençol freático que

dão origem aos fluxos d'água. Essas águas passam a formar a rede de drenagem. Os impactos ambientais negativos, provocados em qualquer porção da bacia podem interferir na quantidade e qualidade da água e, dependendo do impacto, formas ou alternativas diferentes de manejo deverão ser implantadas visando à melhoria do ambiente (LEAL *et al.*, 2017).

As nascentes urbanas tiveram seus ambientes ocupados ou degradados, devido ao advento do processo de urbanização no Brasil, sem considerar a sua importância para o abastecimento de água na superfície e no funcionamento do ciclo hidrológico (NEGRI-SAKATA; KIMURA, 2018).

A ocupação desordenada de áreas urbanas tem como consequência problemas relacionados a áreas de risco (OLIVEIRA *et al.*, 2006). Entre os riscos naturais associados à constante expansão urbana estão os riscos geomorfológicos. Conforme Goudie (2010) a incidência desse tipo de risco pode ser agravada ou iniciada por atividades antropogênicas como ocupação do solo e mudanças na cobertura da superfície.

Os países em desenvolvimento enfrentam mais impactos oriundos de riscos naturais devido à rápida urbanização, à exploração excessiva dos recursos naturais e a ausência de gestão territorial (GARCÍA-SORIANO *et al.*, 2020). As pesquisas de risco possuem como uma de suas tarefas mais importantes, dar suporte aos tomadores de decisões com critérios e processos claros e precisos. Esses critérios são fundamentais para a elaboração de políticas de gerenciamento de risco (OLIVEIRA; BORGES, 2018).

Certos tipos de riscos geomorfológicos como movimentos de massa e processos erosivos podem acarretar mudanças na dinâmica de vazão do fluxo hídrico de bacias hidrográficas (ALMEIDA *et al.*, 2018).

Considerando os argumentos supracitados, é de suma importância analisar o risco geomorfológico na região de nascentes urbanas, especialmente a partir da modelagem da área onde esses recursos hídricos estão inseridos. Portanto, geotecnologias e tecnologias ambientais surgem como um grande subsídio para projetos de revitalização.

Sendo assim, a presente pesquisa teve como objetivo aplicar uma metodologia de utilização de tecnologias ambientais e geotecnologias para a análise do risco geomorfológico na microbacia das nascentes urbanas do rio Mundaú chamadas Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria no município de Garanhuns do estado de Pernambuco. Os resultados da pesquisa podem subsidiar o desenvolvimento de um planejamento urbano que leva em consideração os limites da paisagem natural, contribuindo para a recuperação e preservação das nascentes urbanas.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Aplicar tecnologias ambientais e geotecnologias na análise do risco geomorfológico nas microbacias das nascentes do rio Mundaú chamadas Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria localizadas no município de Garanhuns – PE.

2.2 Específicos

- Modelar a estabilidade do relevo e da erosão hídrica das microbacias das nascentes estudadas;
- Determinar o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) do perímetro urbano de Garanhuns-PE e das microbacias supracitadas;
- Mapear o risco geomorfológico na área urbana de Garanhuns e nas microbacias supracitadas;
- Elaborar recomendações de aplicações de tecnologias ambientais para a revitalização e mitigação dos riscos geomorfológicos em cada microbacia.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Risco geomorfológico

Antes do aparecimento do *Homo sapiens*, o sistema puramente natural governava o planeta Terra. Vários eventos geofísicos, como terremotos, erupções vulcânicas, deslizamentos de terra e / ou inundações ocorriam ameaçando apenas a flora e a fauna prevalentes. Milhões de anos depois, a presença humana transformou os eventos geofísicos em desastres naturais (ALCÁNTARA-AYALA, 2002).

Uma contribuição prática significativa da geomorfologia é a identificação de formas de relevo estáveis e locais com baixa probabilidade de envolvimento catastrófico ou progressivo com processos naturais ou induzidos pelo homem adversos à ocupação ou uso humano. Riscos existem quando os processos de desenvolvimento da paisagem entram em conflito com a atividade humana, muitas vezes com resultados catastróficos (ROSENFELD, 2004 *apud* GOUDIE, 2010).

Os riscos geomorfológicos equacionam a probabilidade de ocorrência, no espaço e no tempo, de situações de instabilidade topográfica e geomorfológica na superfície terrestre e suas implicações na segurança de pessoas e bens. As manifestações dos riscos geomorfológicos afetam, geralmente, vias de comunicação e edifícios, o que acarreta elevados prejuízos materiais, podendo mesmo, em alguns casos extremos, causar a perda de vidas humanas (CUNHA; RAMOS, 2013).

Os riscos geomorfológicos podem ser classificados em três categorias principais: endógenos, exógenos e induzidos por mudanças climáticas e de uso do solo. Neotectônica e atividade vulcânica são processos endógenos, enquanto enchentes, colapsos de relevos cárnicos, avalanches de neve, erosão, sedimentação, deslizamentos de terra, tsunamis, riscos costeiros e outros, estão entre os processos exógenos. Além disso, também ligados ao clima e às mudanças no uso da terra estão os processos erosivos, como desertificação, degradação da terra, salinização e inundações (SLAYMAKER, 1996 *apud* ALCÁNTARA-AYALA, 2010).

O planejamento e a gestão de riscos geomorfológicos, tem se consolidado nos últimos anos devido à intensificação de processos erosivos, movimentos de massa, alagamentos, enchentes e inundações em áreas susceptíveis a tais processos, associados a densas ocupações de populações socialmente vulneráveis (ALMEIDA *et al.*, 2018). A topografia, vegetação clima, lençol freático e até mesmo atividades antropogênicas são todos afetados pelo crescimento urbano a partir de diversos mecanismos (MOHAPATRA *et al.*, 2014).

A população estabelecida em áreas urbanas, em especial, a de baixo poder aquisitivo, tem sido afetada por desastres causados pela ação de processos da dinâmica superficial. Os desastres naturais, além das perdas econômicas, têm sido responsáveis por inúmeras vítimas. As áreas onde ocorrem, ou há possibilidade de ocorrências desses eventos com acidentes, são chamadas de “áreas de risco”. Entre os processos da dinâmica superficial causadores de acidentes que afetam a população, têm-se as inundações/alagamentos e as diversas formas de erosões e movimentos de massa (RECKZIEGEL *et al.*, 2005).

De forma geral os riscos geomorfológicos são intensificados por práticas de expansão urbana que não levam em consideração os limites da paisagem natural. Como naturalmente, comunidades se assentam próximas a recursos hídricos como nascentes, suas microbacias são consideravelmente afetadas por ações antropogênicas e se tornam muito mais vulneráveis aos efeitos dos desastres geomorfológicos.

3.2 Nascentes

Conforme Felipe e Magalhães Junior (2013) não há um consenso na literatura especializada sobre o conceito de nascentes e cada pesquisador utiliza a definição mais conveniente em sua pesquisa. Entretanto, tal método pode acarretar enganos e desentendimentos na comparação dos resultados de diferentes trabalhos. Sendo assim, os Autores supracitados propõem que as nascentes sejam consideradas como um sistema ambiental em que o afloramento da água subterrânea ocorre naturalmente, de modo temporário ou perene, e cujos fluxos hidrológicos na fase superficial são integrados à rede de drenagem.

Para a Lei Federal Nº 12.651, de 25 de maio de 2012 o conceito de nascente é: afloramento natural do lençol freático que apresenta perenidade e dá início a um curso d’água.

Nascentes são elementos essenciais do ciclo hidrológico sendo vitais para o desenvolvimento cultural, econômico e tecnológico da sociedade. A relevância da sua proteção é evidenciada pelos marcos legais brasileiros (CARMO *et al.*, 2014). São formadas quando um aquífero atinge a superfície e passa a propagar a água armazenada no subsolo, e são influenciadas por diversos fatores como clima, cobertura vegetal, topografia, geologia e a forma de uso e ocupação de suas adjacências (LOZINSKI *et al.*, 2010).

As nascentes podem ser classificadas quanto ao seu regime de água, sendo perenes quando apresentam fluxo contínuo, temporárias caso o fluxo ocorra apenas durante a estação de chuvas e efêmeras quando surgem durante uma chuva e permanecem somente por alguns dias (CALHEIROS *et al.*, 2009).

Quanto ao grau de conservação, Pinto (2003) classificou as nascentes como preservadas, perturbadas e degradadas. As que apresentam um mínimo de 50 metros de vegetação natural em seu entorno sem sinais de perturbação ou degradação são classificadas como preservadas. Perturbadas são as nascentes que não possuem o mínimo de vegetação de 50 metros, porém, encontram-se em bom estado de conservação mesmo com a presença de pastagem ou agricultura. As degradadas são as que possuem elevado grau de perturbação, escassez de vegetação e sinais de erosão.

3.3 Degradação das nascentes

A água é um recurso natural essencial para o desenvolvimento da vida humana fazendo com que a humanidade se estabelecesse em locais onde ela era abundante. O processo mundial de crescente urbanização acarretou degradação em larga escala dos recursos hídricos especialmente em países tidos como subdesenvolvidos como o Brasil (SOARES *et al.*, 2013).

O processo de ocupação do Brasil, caracterizado pela ausência de planejamento acarretou fragmentação de áreas naturais que cederam espaço para culturas agrícolas, pastagens e cidades. Esse processo teve como consequência a degradação dos recursos hídricos naturais (BIELLA; COSTA, 2006).

A ocorrência não planejada de altas concentrações populacionais em áreas urbanas resulta em diversos problemas envolvendo a qualidade de água no ambiente como despejo de esgoto em rios e aterramento de nascentes (SOARES *et al.*, 2013).

Além da contaminação, possíveis alterações na vazão das nascentes são consequências da ocupação urbana que podem significar o desaparecimento da nascente ou sua transformação em nascente temporária (FELIPPE; MAGALHÃES JUNIOR, 2012).

A Lei Federal Nº 12.651, de 25 de maio de 2012, estabelece que as áreas em um raio de 50 metros no entorno das nascentes são Áreas de Preservação Permanente que são protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com a função de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas.

Entretanto, os limites estabelecidos pela lei supracitada são frequentemente ignorados pela constante expansão urbana, e conforme Lozinski *et al.* (2010), não respeitar a distância de 50 metros pode acarretar degeneração de nascentes. Carmo *et al.* (2014), questiona a eficácia desses limites impostos e propõe que há a necessidade de uma padronização para a identificação das nascentes, desde o seu conceito até o mapeamento, para que os elementos fundamentais de

proteção não sejam postos de lado pela mera consideração de 50 metros em torno dos pontos iniciais de canais demarcados.

Para Calheiros *et al.* (2009), a restrição de 50 metros, estabelecida pela Lei Federal Nº 12.651 de 25 de maio de 2012, evita situações como cultivos ao redor da nascente que pode causar contaminações físicas, biológicas e químicas assim como evita deixar o solo sujeito à erosão oriunda do escoamento superficial, que por sua vez pode contaminar a água com partículas de solo ou até mesmo provocar o soterramento da nascente.

3.4 Erosão do solo

É um processo que consiste em duas fases, sendo a primeira o desprendimento de partículas individuais de solo do maciço e a segunda o transporte dessas partículas por agentes erosivos como escoamento hídrico e o vento. O contato de gotas de chuva com o solo é um dos maiores agentes do desprendimento, cada gota que entra em contato com o solo pode dispersar partículas do solo ao longo de diversos centímetros (MORGAN, 2005).

Atividades antropogênicas podem exercer uma enorme influência nos processos erosivos, chegando em algumas circunstâncias a aumentar a sua velocidade em até cem vezes mais que o normal. A remoção da cobertura vegetal durante essas atividades deixa o solo desprotegido o que pode acarretar uma redução de fertilidade e produtividade do solo, assim como danos na integridade física do relevo (JULIEN, 1998).

A equação USLE (Equação Universal de Perdas de Solo) fornece uma estimativa da perda de solo anual e permite que agrônomos e profissionais que atuam na conservação do solo selecionem os métodos mais apropriados para conservação, cultivo e uso do solo. Desde sua introdução em 1958, a equação passou por várias revisões sendo uma delas a mais utilizada chamada de RUSLE (Equação Universal de Perdas de Solo Revisada) (HUDSON, 1993).

Conforme Ganasri e Ramesh (2016) o método RUSLE foi desenvolvido por Wischmeier e Smith em 1978 e é composto pela Equação 1.

$$A = R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Sendo A a perda de solo por unidade de tempo; R é o fator de erosividade da chuva; K é o fator de erodibilidade do solo; LS é o fator de declividade e comprimento do relevo; C é o fator de manejo do solo e P é o fator de prática contra a erosão.

A erosão do solo é um dos fatores que contribuem para a ocorrência de movimentos de massa em encostas e taludes. A água e o vento erodem continuamente taludes e encostas, causando mudanças na geometria do maciço, modificando seu estado de tensões o que pode acarretar ruptura do maciço (BUDHU, 2010). A infiltração de água oriunda do escoamento superficial aumenta a poropressão do solo em áreas de alta declividade e diminui sua estabilidade (HAUGEN, 2017).

Os movimentos de massa contribuem para o acúmulo de sedimentos no pé da encosta comprometendo a vazão das nascentes assim como a qualidade da água.

3.5 Estabilidade de encostas

Existem diversos tipos de movimentos de massa e eles são caracterizados como importantes processos erosivos naturais responsáveis pela evolução das vertentes e interflúvios que resultam no assoreamento e deposição de materiais em fundos de vales ou planícies, afetando o relevo como um todo (PINTO *et al.*, 2015). Talude é a denominação dada a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ele ser natural ou artificial, os naturais são popularmente chamados de encostas já os artificiais são provenientes de processos de corte ou aterro (GERSCOVICH, 2012).

O deslizamento de taludes naturais e artificiais resultam em mortes, destruição, perdas econômicas, e impactos ambientais negativos. Alguns deslizamentos são repentinos e catastróficos, outros são difundidos e outros são localizados, sendo difícil apontar com precisão a magnitude do deslizamento (BUDHU, 2010).

Em países em desenvolvimento, os riscos de movimentos de massa estão crescendo. O aumento da pressão populacional e do desenvolvimento econômico forçam um contingente maior de pessoas a se mudarem para áreas potencialmente perigosas, que são menos adequadas para a agricultura e pastagens (VANACKER *et al.*, 2003).

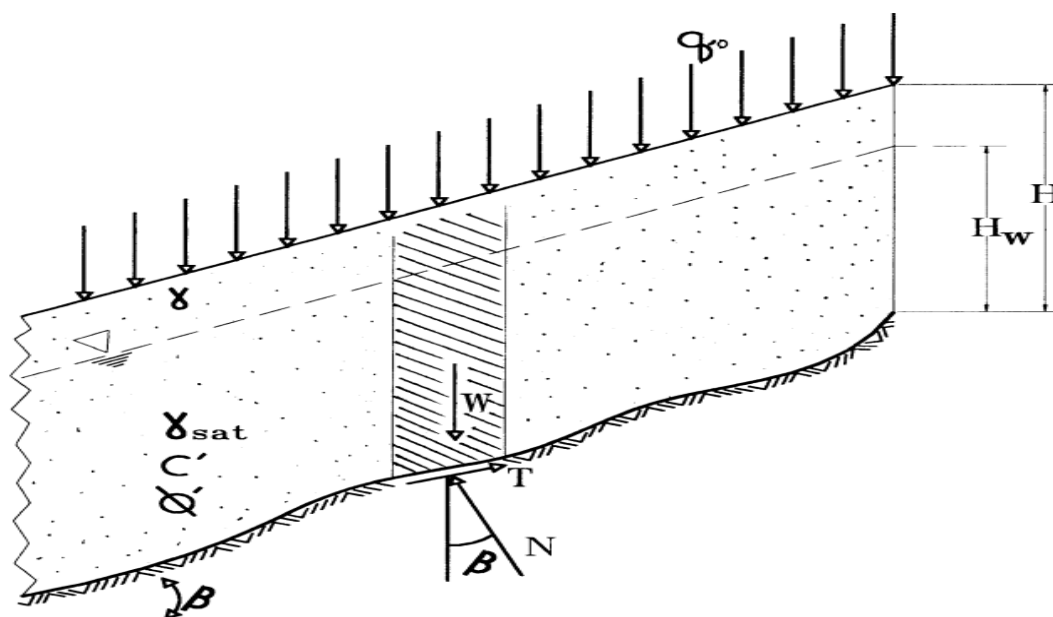
Deslizamentos de terra afetam os seguintes elementos do meio ambiente: a topografia da superfície da terra, as características e a qualidade dos rios e córregos e fluxos de água subterrânea, florestas, e o habitat natural da fauna que existe na superfície terrestre incluindo rios, lagos e oceanos. Grandes quantidades de terra e material orgânico entram rios como sedimentos resultantes de movimentos de massa e erosão, reduzindo assim a potabilidade da água e a qualidade do habitat da fauna (GEERTSEMA *et al.*, 2009).

Considerando a possibilidade de existência de nascentes nas adjacências de encostas, é de suma importância analisar a estabilidade desses maciços com o intuito de modelar a

sedimentação na nascente e elaborar projetos de mitigação e monitoramento. Conforme Calheiros (2009) as nascentes se localizam em encostas ou depressões do terreno, ou ainda, no nível de base representado pelo curso d'água local.

Conforme Schor e Gray (2007), o modelo do talude infinito (Figura 1) é propício para análise de rupturas superficiais em encostas e resulta em um fator de segurança que reflete a relação entre a resistência da encosta e as cargas atuantes (Equação 2).

Figura 1: Esquemática do modelo do talude infinito.



Fonte: SCHOR; GRAY, 2007.

$$FS = \frac{[c' / \cos^2 \beta \tan \varphi + (q_0 + \gamma H) + (\gamma_{buoy} - \gamma) H_w] \tan \varphi / \tan \beta}{[(q_0 + \gamma H) + (\gamma_{sat} - \gamma) H_w]} \quad (2)$$

Sendo c' a coesão do solo; β e φ representam a declividade do talude e o ângulo de atrito interno; γ , γ_{buoy} , γ_{sat} são os pesos específicos seco, submerso e saturado, respectivamente; H e H_w representam a profundidade até a superfície de ruptura e o nível d'água; q_0 é a sobrecarga uniformemente distribuída no terreno e FS é o Fator de Segurança.

Conforme Mergili *et al.* (2014), modelos determinísticos baseados em Sistemas de Informações Geográficas – SIG podem ser utilizados, em áreas extensas, para o mapeamento da susceptibilidade de maciços à movimentos de massa.

Para Rosa (2005), as geotecnologias também conhecidas como geoprocessamento são um conjunto de tecnologias que possuem como objetivo coletar, analisar, processar e ofertar informações georeferenciadas. Entre as geotecnologias destacam-se: cartografia digital,

sensoriamento remoto, topografia, sistema de posicionamento global e os Sistemas de Informações Geográficas – SIG.

3.6 Geoprocessamento

Pode ser definido como um conjunto de operações realizadas por um Sistema de Informações Geográficas (SIG) para manipulação de dados espaciais. Uma operação típica de geoprocessamento seleciona um determinado conjunto de dados, realiza uma operação nele e retorna o resultado como um conjunto de dados de saída. Operações comuns incluem a sobreposição de *layers* geográficos, seleção e análise de características geográficas, processamento de topografia, processamento de *rasters* e conversão de dados. Em suma, o geoprocessamento permite a definição, administração e análise de informações utilizadas para tomar decisões (WADE *et al.*, 2006).

SIGs são sistemas projetados para captura, armazenamento, manipulação, análise, manuseio e apresentação de todos os tipos de dados espaciais ou geográficos (FOOTE, *et al.*, 1995). Para Kim *et al.* (2004), uma das vantagens de tais sistemas é que todos os atributos espaciais de um ponto em particular podem ser salvos em um mapa digital, e conseqüentemente podem ser atualizados, filtrados e modificados.

Diversos *softwares* avaliam a estabilidade de taludes sem serem auxiliados pelo geoprocessamento. No entanto, a aplicação de tais *softwares* é trabalhosa já que as informações do talude como declividade e características do solo devem ser preparadas para cada perfil distinto do talude, principalmente em áreas extensas onde a análise é realizada para toda a região e não somente em um talude único (THIEBES *et al.*, 2013). Sendo assim, Halounová (2002) aponta que, como as variáveis envolvidas na estabilidade de encostas são condições espaciais, o uso do geoprocessamento surge como um grande subsídio para a análise em áreas extensas.

Em suma, o geoprocessamento é um ambiente que permite a criação de bancos de dados georreferenciados assim como modelos matemáticos cuja base é o georreferenciamento. Esse ambiente, permite a aplicação dos modelos de estabilidade de encostas assim como os de estimação de perda de solo por erosão oriunda do escoamento hídrico. A modelagem da área é essencial para garantir a eficiência do projeto de recuperação ambiental. Sendo assim, o geoprocessamento surge como um grande subsídio para a revitalização de áreas degradadas.

3.7 Recuperação de nascentes

Conforme Osaky (1994, *apud* SOUZA, 2004) as técnicas para recuperação de nascentes são divididas em dois grupos: as que são executadas na área responsável pela formação do lençol que as abastece e aquelas que agem diretamente na nascente. As práticas para a recuperação de nascentes vão desde a instalação de sistemas de decantação e filtração até o isolamento da área com cercas.

Métodos que visam a restauração de áreas degradadas, podem ser considerados como tecnologias ambientais que conforme Lustosa (2002, *apud* PRATES, 2006) podem ser definidas como o conjunto de conhecimentos, técnicas, métodos, processos, experiências e equipamentos que utilizam os recursos naturais de forma sustentável.

Cada vez mais surgem novas técnicas para promover a recuperação de áreas degradadas, e a bioengenharia tem sido utilizada em diversas situações com sucesso (JORGE; GUERRA, 2013). A bioengenharia do solo e da água é uma tecnologia que encoraja a combinação do conhecimento científico com o empírico para o gerenciamento de ecossistemas com o objetivo de maximizar os benefícios tanto para o homem quanto para o ambiente natural. Essa tecnologia envolve técnicas que utilizam plantas como materiais de construção, com o objetivo de promover restauração ecológica, ou para o controle de riscos naturais como erosão do solo, inundações torrenciais e movimentos de massa (REY *et al.*, 2019). O Quadro 1 apresenta as vantagens técnicas, ecológicas, econômicas e estéticas dos métodos de bioengenharia.

Quadro 1: Vantagens da bioengenharia.

VANTAGENS	
TÉCNICAS	Proteção contra erosão superficial Aumento na estabilidade das encostas através do reforço e drenagem do solo pelas raízes Proteção contra a queda de rochas Proteção contra o vento
ECOLÓGICAS	Regulação da umidade e temperatura próximas à superfície, criando condições adequadas para o crescimento vegetal Aperfeiçoamento do regime hídrico do solo através da interceptação, evapotranspiração e armazenamento Melhoramento da estrutura do solo e formação de um horizonte superior Criação e provisão de habitats para a fauna e flora locais Utilização de materiais biodegradáveis
ECONÔMICAS	Redução de custos de construção e manutenção Criação de áreas agricultáveis e de lazer
ESTÉTICAS	Integração das estruturas à paisagem Redução da poluição visual A paisagem se torna mais atraente

Fonte: ARAUJO *et al.*, 2005 *apud* OROZCO, 2009.

Quando aplicada corretamente e subsidiada por um planejamento ambiental robusto, a bioengenharia surge como um grande subsídio para a revitalização de nascentes e para o controle do risco geomorfológico em áreas afetadas pelos processos de urbanização.

4. MATERIAL E MÉTODOS

A presente pesquisa implementou análises integradas da área de estudo, equacionando as inter-relações existentes na paisagem em questão, ponderando desde os processos oriundos do meio até os de caráter antropogênicos.

Sendo assim, a pesquisa foi realizada a partir das seguintes etapas: revisão bibliográfica, coleta de dados em campo, modelagem e análise da topografia, escoamento superficial, NDVI, estabilidade do relevo e erosão tanto da área urbana de Garanhuns como um todo quanto das microbacias das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria. A partir dos resultados, foram elaboradas recomendações que objetivam a mitigação dos riscos geomorfológicos e a recuperação das microbacias a partir da utilização de tecnologias ambientais e geotecnologias. A modelagem da topografia e escoamento superficial foi realizada a partir do *software* ArcGIS, enquanto os cálculos de estabilidade do relevo, NDVI e erosão hídrica foram realizados a partir da elaboração de algoritmos na ferramenta *Model Builder* do *software* supracitado.

Durante a fase de revisão de literatura, foram pesquisados livros, artigos e projetos com ênfase nos temas de recuperação de áreas degradadas, geotecnologias, tecnologias ambientais, gestão de recursos hídricos, mecânica dos solos e risco geomorfológico.

4.1 Caracterização do local de estudo

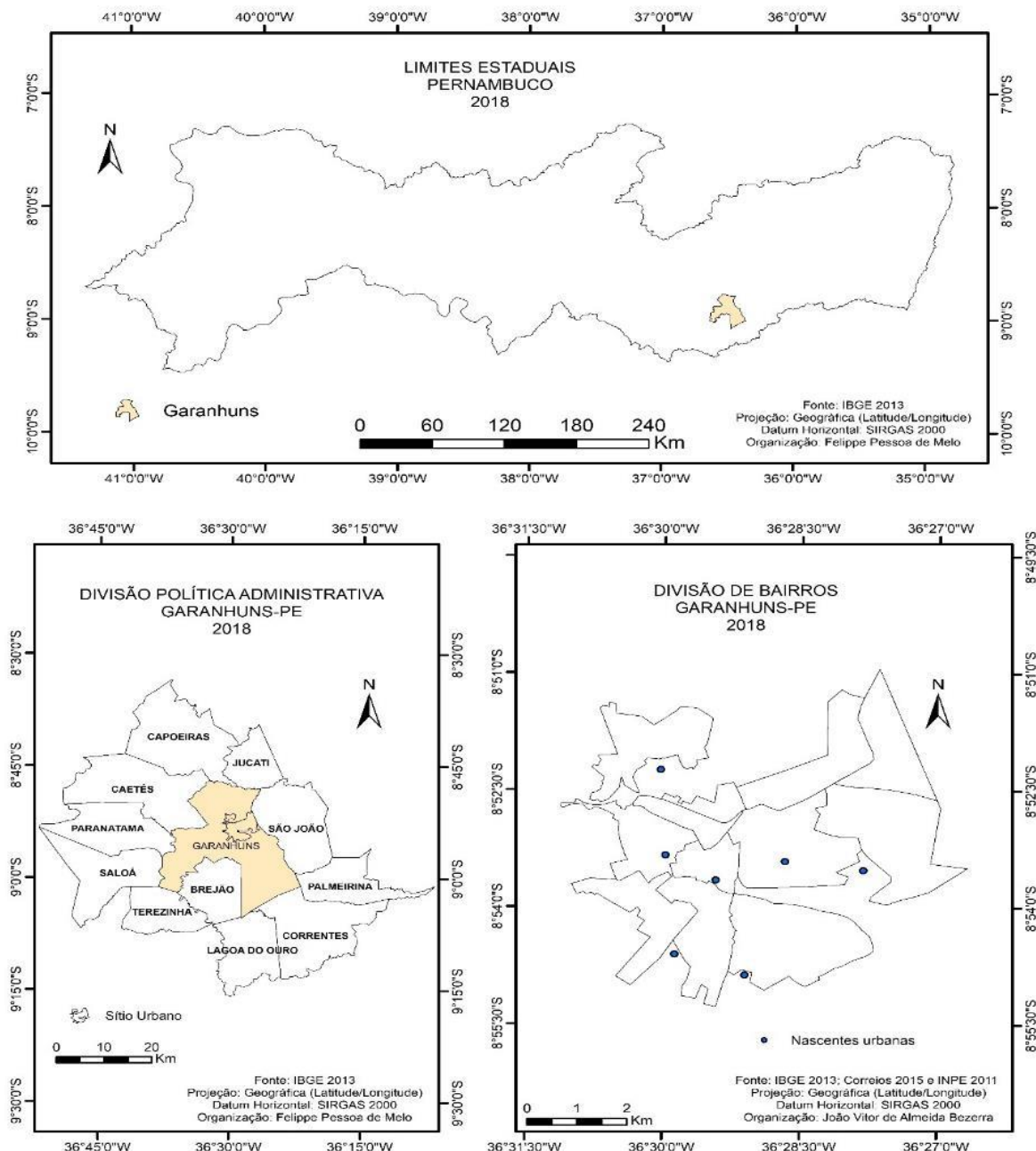
O município de Garanhuns (Figura 2) possui uma área de 458.55 km² delimitada pelas coordenadas geográficas de: -8° 51' 37" / -8° 55' 40" e -36° 26' 06" / -36° 30' 52". Apresenta elevada amplitude topográfica com média altimétrica de 850m e máxima de 1050m conforme o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2011).

Apesar do município ficar situado sob os domínios do clima semiárido, apresenta-se como uma área de exceção, com temperaturas amenas e elevados índices pluviométricos, isto é, tomando como referência as especificidades do clima semiárido. Conforme Melo e Souza (2016) mesmo situado no polígono das secas da região Nordeste, devido ao domínio do clima semiárido, Garanhuns se apresenta como uma área atípica, ficando sob a influência do clima Mesotérmico Tropical de altitude.

O perímetro urbano de Garanhuns, bem como seu entorno, possui um clima do tipo mesotérmico do tipo Csa, com chuvas de outono e inverno segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual encontra-se em torno de 20°C. Durante o inverno as temperaturas

podem atingir uma queda para menos de 17°C, com mínima absoluta de 10°C. No verão as máximas absolutas chegam a 36°C. (NIMER, 1989, *apud* AZAMBUJA e CORRÊA, 2015).

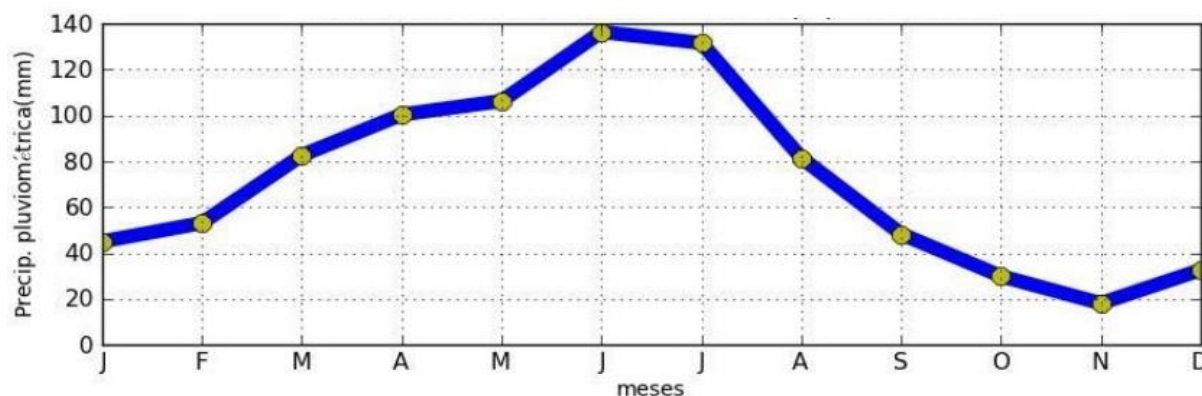
Figura 2: Localização da área de estudo.



Fonte: IBGE 2013; CORREIOS 2015 e INPE 2011.

Barbosa *et al.* (2016), realizaram uma avaliação das tendências climáticas da precipitação pluviométrica e dos índices extremos climáticos no município de Garanhuns, utilizando dados do INMET (2015) referentes ao período de 1961 a 2014 e os seus resultados indicaram que as médias históricas mensais de precipitação (Figura 3) demonstram uma tendência crescente entre os meses de fevereiro e junho, atingindo seu ápice neste último mês.

Figura 3: Médias históricas mensais de precipitação pluviométrica em Garanhuns – PE.



Fonte: INMET, 2015 *apud* BARBOSA *et al.*, 2016.

Entre 1982 e 2004, a extensão urbana de Garanhuns sofreu um aumento considerável de 76,43 km² para 150,57 km² em decorrência do papel de polo regional que o município exerce e pela política de erradicação do café implantada pelo Instituto Brasileiro do Café – IBC (MELO, 2013). A referida erradicação fez com que Garanhuns passasse a receber um contingente populacional de forma repentina sendo aqueles oriundos do campo, fixados em áreas de baixo valor comercial como encostas e fundos de vales (MELO; SOUZA, 2015).

A partir de 1970, a malha urbana de Garanhuns passou a se expandir com maior intensidade acarretando o surgimento e intensificação de diversos problemas socioambientais, como condições precárias de moradias em áreas de risco e a poluição de nascentes que outrora foram utilizadas para abastecimento da população (SOARES *et al.*, 2013).

O crescimento do centro urbano garanhuense ocorre de forma rápida e majoritariamente sem planejamento adequado, gerando diversos problemas socioambientais e dentre eles destacam-se as condições precárias de moradia em áreas de risco, o aterramento e a poluição de nascentes. Essa dinâmica de crescimento ganhou ainda mais força nos anos 2000 devido a uma expressiva expansão universitária e ao crescimento do setor de serviços (SOARES; TROLEIS, 2018).

A geomorfologia da região, o alto índice pluviométrico e o crescimento desordenado agravam os processos erosivos na região contribuindo para a instabilidade de maciços e sedimentação das nascentes, criando um cenário de risco geomorfológico.

Soares *et al.* (2013), afirmam que Garanhuns possui inúmeras nascentes e as mais importantes por terem participado no abastecimento da região, por terem água comercializada ou por contribuírem para o Rio Mundaú são as seguintes: Olho d'água, Riacho São Vicente, Pau Amarelo, Vila Maria, Pau Pombo, Vale Mundaú, Serra Branca.

Considerando o alto índice pluviométrico de Garanhuns quando comparado às regiões vizinhas e que as nascentes contribuem para o abastecimento do Rio Mundaú, a revitalização dessas áreas degradadas assim como o monitoramento e controle do risco geomorfológico pode agir como um grande subsídio contra a escassez de recursos hídricos na região.

Nesse estudo, além de uma análise da área urbana do município de Garanhuns como um todo, foram analisadas as microbacias das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria. Conforme Soares e Troleis (2018) essas três nascentes possuem contextos socioambientais similares que evidenciam impactos cumulativos de mais de um século.

4.2 Modelagem do relevo de Garanhuns

Inicialmente, foram obtidos dados do relevo da área a partir do programa ASTER GDEM v2 da Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço - NASA (2011) que possuem resolução de 30 metros. Posteriormente, os dados foram processados no *software* Global Mapper 16, para alteração da projeção para UTM – Universal Transversa de Mercator e datum SIRGAS2000. Após o processamento dos dados, foi realizada uma modelagem da topografia e escoamento superficial a partir do *software* Surfer que resultou em uma representação 3D do relevo e das linhas de fluxo da bacia.

A modelagem supracitada permitiu a modelagem do relevo, da declividade, do direcionamento de fluxo e da delimitação das bacias hidrográficas. Entretanto, os *softwares* supracitados não fornecem ferramentas prontas para análise da estabilidade de encostas ou da erosão do solo. Sendo assim, para complementar a modelagem a ferramenta *Model Builder* do *software* ArcGIS foi utilizada para a elaboração de algoritmos que visam aplicar métodos tradicionais de avaliação de erosão e estabilidade de encostas em dados georreferenciados.

Conforme Cascales *et al.* (2017), a ferramenta *Model Builder* do *software* ArcGIS permite criar e automatizar fluxos de trabalho através de cadeias de comandos e geoprocessos a partir de um banco de dados de entrada.

4.3 Modelagem da estabilidade

Para a modelagem da estabilidade das encostas o algoritmo elaborado tem como base o modelo tradicional do talude infinito utilizando a Equação 2 (p. 18) por Schor e Gray (2007). O algoritmo faz uso da ferramenta *Raster Calculator* para realizar as operações matemáticas

necessárias, utilizando dados georreferenciados e aplicando a fórmula para cada célula do *raster* do modelado da área. O resultado da modelagem consiste no fator de segurança entre 0 e 3,0.

Os dados relacionados as características do solo são essenciais para a aplicação do algoritmo. Entretanto, há uma enorme dificuldade na obtenção desses dados, pois, em virtude da constante expansão urbana, as microbacias onde as nascentes estão inseridas foram afetadas por inúmeros aterros com materiais diferentes, impossibilitando uma caracterização adequada do solo. Sendo assim, considerando as dificuldades supracitadas, é necessário presumir uma textura para o solo da área de estudo. Para tal, foram coletados dados da Base de Dados Mundial Harmonizada sobre o Solo - HWSD versão 1.2 redimensionados por Wieder *et al.* (2014), relativos à porcentagem média de areia, silte e argila da camada superficial do solo.

De acordo com os dados supracitados, o solo da região possui uma proporção de 69% de areia, 8% de argila e 23% de silte, configurando um solo franco-arenoso conforme o triângulo de classificação textural elaborado pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA (2017). Entretanto, o solo da área de estudo é classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico conforme a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA (2001) e de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO (2015) Argissolos possuem um teor de argila maior no seu subsolo do que na sua camada superficial. Portanto, foi decidido estabelecer o solo da área de estudo como sendo areno-argiloso durante o processo de modelagem.

Os pesos específicos médios seco e saturado foram coletados conforme o intervalo de valores típicos para um solo areno-argiloso confeccionado por Conduto (2001). Enquanto os valores médios da coesão e ângulo de atrito interno para solos arenoso-argilosos foram coletados no banco de dados de solos contidos no *software* Geo5 – Slope Stability (2016).

Considerando que de acordo com Schor e Gray (2007) o modelo do talude infinito é propício para a análise de movimentos de massa superficiais, foi considerada uma profundidade até a superfície de ruptura de 3 metros. De acordo com Dou *et al.* (2015), o Instituto Nacional de Pesquisas De Ciências Da Terra do Japão classifica movimentos de massa como superficiais quando a profundidade até a superfície de ruptura é menor que 10 metros.

Seguem abaixo os parâmetros do solo utilizados na modelagem:

- Peso específico seco = 17 kN/m³;
- Peso específico saturado = 19,25 kN/m³;
- Peso específico submerso = 9,25 kN/m³;
- Ângulo de atrito interno (φ) = 26°;
- Coesão efetiva (c') = 6 kPa;
- Profundidade até a superfície de ruptura = 3 metros.

modelagem, foram utilizados os valores mensais de precipitação referentes ao ano de 2020, fornecidos pelo INMET.

Para o fator K, foi utilizado o valor médio encontrado por Moraes e Sales (2017) para um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico equivalente a 0,0592 (t.ha.h/ha.MJ.mm) em uma bacia hidrográfica localizada no Estado do Piauí.

O fator P foi considerado 1 tendo em vista que não existem práticas de proteção a erosão na área de estudo.

O fator LS é uma característica do relevo e foi obtido a partir de um outro algoritmo elaborado no *software* ArcMap a partir da ferramenta *Model Builder* que aplicou a Equação 4 elaborada por Ganasri e Ramesh (2016) no modelado da região.

$$LS = \left[\frac{Q_{AM}}{22.13} \right]^y * (0.065 + 0.045 * S_g + 0.065 * S_g^2) \quad (4)$$

Sendo LS o fator de declividade e comprimento do relevo; Q_a é o *raster* de fluxo acumulado; S_g é a declividade em porcentagem; M é a resolução do *raster* e y é um expoente adimensional que assume um valor de 0.2 a 0.5 a depender do mapa de declividade elaborado por Wischmeier and Smith (1978, *apud* GANASRI e RAMESH, 2016).

O fator C que é o fator de manejo do solo foi calculado em função do NDVI (Índice de Vegetação da Diferença Normalizada) da área de estudo. Conforme Tucker (1979, *apud* DURIGON *et al.*, 2014), o NDVI pode ser calculado a partir da Equação 5. Baseado na ideia de que o NDVI de regiões com grande cobertura vegetal tende a +1 e o fator C tende a 0, Durigon *et al.* (2014), propõe um método baseado no redimensionamento do NDVI para se estimar o fator C (Equação 6).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}} \quad (5)$$

$$C = \left(\frac{-NDVI + 1}{2} \right) \quad (6)$$

Sendo NDVI o índice de vegetação da diferença normalizada; ρ_{NIR} é o valor da banda espectral do infravermelho próximo; ρ_{Red} é o valor da banda espectral do vermelho e C é o fator de manejo do solo.

Para a análise da erosão foram utilizados dados das bandas 4 e 5 do satélite Landsat 8 referentes ao ano de 2018 no mês de dezembro.

4.5 Análise do NDVI

Os valores do NDVI podem variar entre -1 e 1, sendo positivos quando os alvos são rochas, solos descobertos e vegetação, por conseguinte são negativos quando o alvo reflete com maior intensidade na banda vermelha em comparação com a banda do infravermelho próximo, algo comum quando o alvo é composto por nuvens, corpos d'água ou neve. Altos valores de NDVI são associados a maiores densidades de vegetação saudável (CORDEIRO *et al.*, 2017).

Estudos sobre vegetação saudável vem ganhando mais atenção ao longo do tempo, em virtude de seu papel importante em promover serviços ecossistêmicos (NOURI *et al.*, 2017).

As informações da banda espectral do vermelho e infravermelho próximo foram obtidas a partir das bandas 4 e 5 dos satélites Landsat 8 (anos 2015 e 2018) e das bandas 3 e 4 do satélite Landsat 5 (anos 1990, 1995, 2000, 2004 e 2009) no portal Earth Explorer mantido pela instituição científica Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) que os forneceu após a aplicação de correção atmosférica. A escolha da data das imagens foi baseada na intensidade da interferência de nuvens, sendo possível nos anos supracitados coletar dados pouco afetados.

A partir dessas informações foi aplicada a Equação 5 para obter os valores médios de NDVI, assim como os valores do desvio padrão, para a área urbana de Garanhuns. A aplicação das equações foi realizada a partir de um algoritmo elaborado na ferramenta *Model Builder* no *software* ArcGIS. O algoritmo utiliza como base a ferramenta *Raster Calculator* e teve como dado de entrada os *rasters* das bandas espectrais do vermelho e infravermelho que resultou em um *raster* para o NDVI.

Além disso, o NDVI também foi analisado nas adjacências dos cursos d'água da região. Para tal, foi confeccionado, a partir da modelagem do escoamento superficial da região, um mapa delineando uma área de 60 metros ao redor das linhas de fluxo da bacia hidrográfica utilizando o *software* ArcGIS 10.4 e o NDVI médio e o desvio padrão correspondentes a essas áreas foi calculado.

4.6 Elaboração de recomendações para revitalização das nascentes

Os resultados dos algoritmos propiciaram um banco de dados georreferenciados de toda a área urbana de Garanhuns, possibilitando coletar informações essenciais, como declividade e

direção de fluxo. Sendo assim, foram recortados os dados de NDVI, declividade, estabilidade e erosão para as nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria. A partir desse recorte e dos trabalhos em campo, foi possível analisar o risco geomorfológico da microbacia de cada nascente e elaborar recomendações que visam a revitalização dessas áreas.

A elaboração das recomendações para revitalização das nascentes foi embasada pelo referencial teórico que apontou as tecnologias ambientais mais adequadas. As recomendações foram compiladas em uma seção para cada microbacia com o intuito de melhor visualizar quais tecnologias ambientais devem ser aplicadas em cada região e quais serão os benefícios.

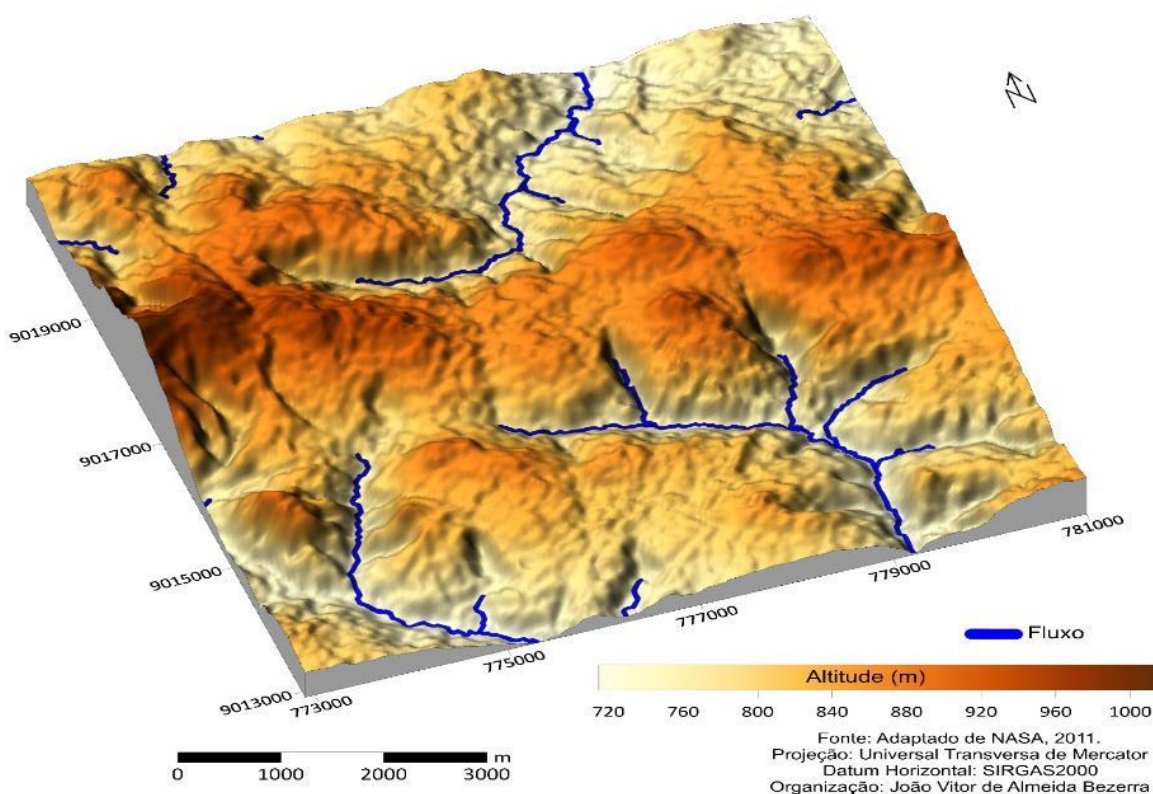
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Relevo de Garanhuns

O modelado 3D (Figura 5) do sítio urbano de Garanhuns e suas adjacências apresentou uma área superficial de 65,37 km² e as linhas de fluxo superficial geradas resultaram em um total de 25,03 km de comprimento. Foi gerada uma área de 60 metros ao redor das linhas de fluxo no *software* ArcGIS 10.4 com uma área total de 3,02 km². A declividade média encontrada pelo modelo do sítio urbano foi de 7,33° enquanto a máxima foi de 35,46°.

A partir do modelado, é possível observar que a maior parte da região com menor altitude e declividade encontra-se nas extremidades do sítio urbano. Conforme Melo e Souza (2015) entre as estruturas somitais de Garanhuns, encontram-se vales abertos, com vertentes agudas, todavia ao longo do afastamento do perímetro urbano ocorrem suavizações, originando superfícies aplainadas, caracterizadas por intenso processo de deposição de sedimentos das feições mais elevadas, principalmente devido a erosão hídrica.

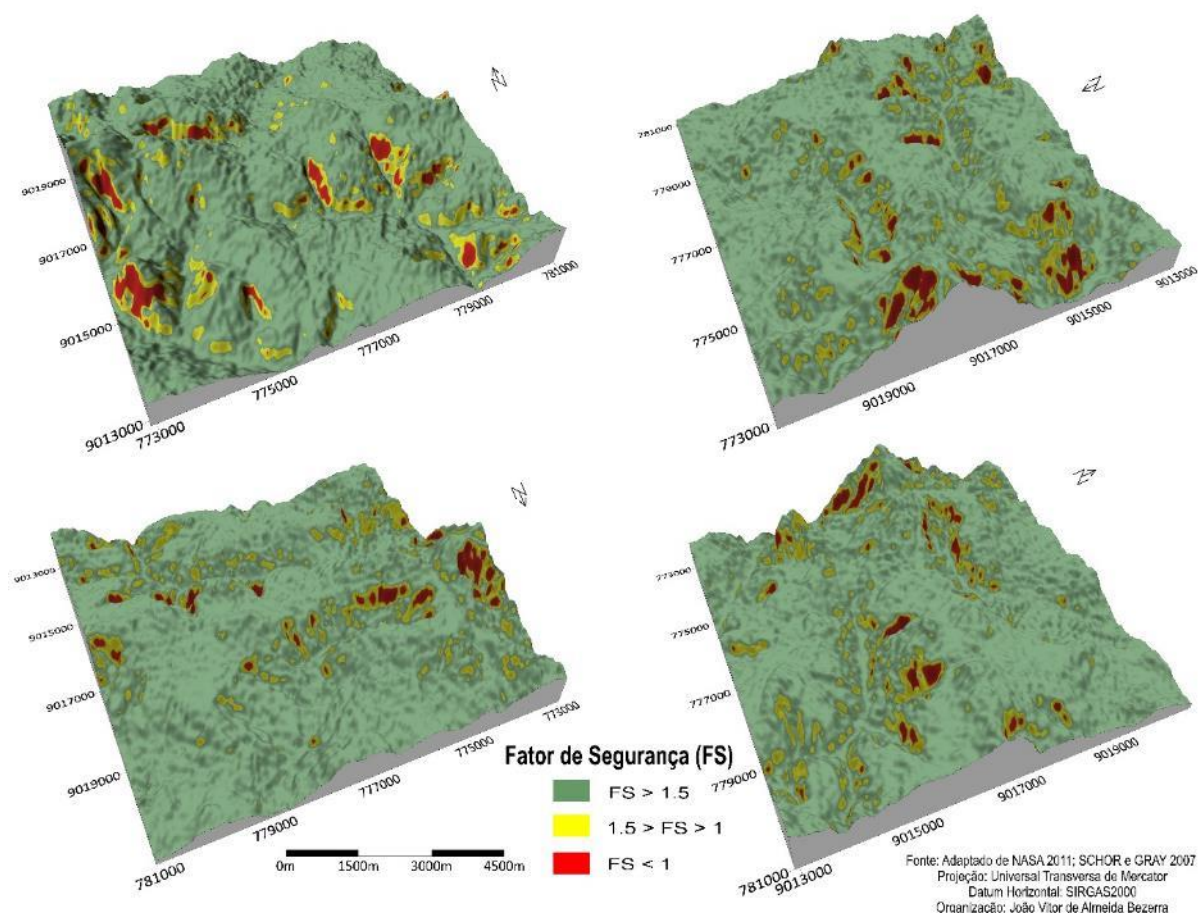
Figura 5: Modelado do perímetro urbano e adjacências de Garanhuns-PE.



Fonte: NASA, 2011.

A modelagem da estabilidade (Figura 6) proporcionou um retrato do risco geomorfológico na área urbana de Garanhuns. Observa-se que as áreas de maior declividade como as encostas se encontram vulneráveis a movimentos de massa superficiais caso ocorra saturação do solo (Fator de Segurança < 1).

Figura 6: Modelado da estabilidade do relevo de Garanhuns - PE.



Fonte: Adaptado de NASA, 2011.

Esse cenário é cada vez mais provável de se tornar realidade quando se consideram os efeitos da atuação antrópica constante na região, com a construção de habitações em vertentes íngremes. Conforme Silva *et al.* (2018), a ocupação desordenada de áreas de encosta aliada a ausência de um planejamento adequado, associado ainda a eventos de ordem natural, acabam acarretando perdas sociais e econômicas.

O resultado da modelagem evidenciou que aproximadamente 2,45% (1,60 km²) do perímetro urbano possui um FS (Fator de Segurança) menor que 1 e 9,09% (5,94 km²) um fator de segurança menor que 1,5 que é o mínimo exigido pela NBR 11682 (ABNT, 2006) para garantir um alto grau de segurança. Esses resultados são preocupantes, tendo em vista que uma

parcela considerável das encostas que se encontram em condições instáveis, estão ocupadas por comunidades extensas. Além disso, na ocorrência de movimentos de massa, toda a área adjacente também é comprometida e não somente a área considerada instável pela modelagem.

Encostas em ambientes urbanos são frequentemente perturbadas por processos antropogênicos como cortes, aterros e descarte de água residuais. Grande parte das áreas de risco no Brasil são intensamente povoadas e estão sobre a influência de diferentes tipos de alterações androgênicas realizadas na paisagem (MENDES *et al.*, 2017).

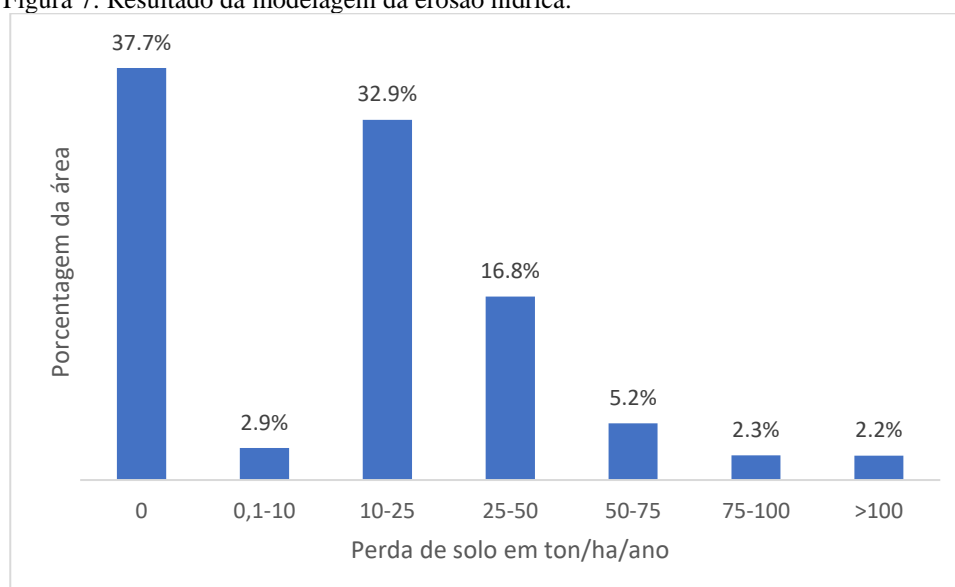
A ocorrência de movimentos de massa pode causar, nas comunidades ao redor, grandes impactos negativos de ordem socioeconômica e ambiental. A minimização desses impactos depende de uma identificação eficaz das áreas de risco, utilizando um processo de análise de susceptibilidade ao fenômeno (DRAGICEVIC *et al.*, 2015).

Admitindo-se que a modelagem foi realizada para a condição de solo saturado, fica evidente a importância da drenagem urbana para que se possa evitar a saturação do substrato do terreno e mitigar os efeitos da erosão hídrica que podem alterar a geometria do maciço.

A infiltração de água oriunda do escoamento superficial aumenta a poropressão do solo em áreas de alta declividade e diminui sua estabilidade. O controle da drenagem do escoamento superficial é recomendado como um método efetivo e barato para a mitigação dos movimentos de massa (HAUGEN, 2017).

A Figura 7 consiste no resultado da modelagem da erosão hídrica do relevo de Garanhuns. A modelagem para as microbacias obteve a mesma proporção de potencial de perda de solo da análise para Garanhuns como um todo.

Figura 7: Resultado da modelagem da erosão hídrica.



Fonte: Elaborado pelo Autor, 2021.

A modelagem resultou em um potencial de perda de solo médio de 19.75 ton/ha/ano, o que equivale a uma média de 129,10 toneladas de solo por ano. Observa-se pela Figura 4 que a modelagem indicou que 37,7% (24,64 km²) do modelado da área urbana de Garanhuns e adjacências não está susceptível a erosão hídrica. Essa parcela de área pode corresponder a regiões com baixa declividade, locais com vegetação densa ou construções.

Observa-se que 49,7% (32,48 km²) da área apresentou um potencial de perda de solo entre 10 e 50 ton/ha/ano. Morgan *et al.* (2004, *apud* MORGAN, 2005), compararam os resultados da aplicação de uma versão modificada da equação USLE com trabalhos em campo em um corredor de petróleo e constatou que valores entre 10 e 50 ton/ha/ano estão relacionados a um nível alto de erosão sendo possível observar indicadores como voçorocas, ravinas e sulcos.

Zachar (1982) propõe um sistema de classificação da intensidade da erosão em função da perda de solo em ton/ha/ano, sendo valores entre 15 e 50 considerados como erosão severa que conforme o Autor, é uma condição de extremo perigo ao solo acarretando redução anual de 5 a 20 mm do solo, podendo levar a remoção total da cobertura superficial em 10 a 40 anos.

Sendo assim, constata-se que mais da metade do solo da área urbana de Garanhuns possui um alto potencial erosivo, fato que agrava consideravelmente o risco geomorfológico na região intensificando a probabilidade de movimentos de massa e contribuindo para a sedimentação das nascentes.

A erosão do solo fornece fontes de massa deslizante para a formação de movimentos de massa. Sendo assim, a partir da introdução da erosão do solo como um fator de predisposição geológico e hidrológico é possível obter resultados mais confiáveis na predição de susceptibilidade a deslizamentos (HUANG *et al.*, 2020). Assim como a modelagem da estabilidade do relevo, o modelo da erosão age como mais um indicador do risco geomorfológico, indicando um cenário de predisposição a movimentos de massa e sedimentação dos recursos hídricos.

Os resultados do modelo de erosão evidenciam a necessidade de sistemas de drenagem urbana assim como a aplicação de um planejamento urbano que leva em consideração os limites do ecossistema local e foca na mitigação de riscos ambientais como os geomorfológicos.

O sítio urbano de Garanhuns está assentado em geoformas, principalmente colinas, que naturalmente já apresentam uma predisposição para maximização dos efeitos do escoamento superficial. Existindo ainda os processos de maximização do perímetro urbano em direção às encostas e fundos de vales. Ambos os fenômenos ocorrem em virtude da saturação dos espaços físicos para a fixação de novas residências e/ou exacerbada especulação imobiliária. Tal arcabouço ocorre sem planejamento urbano compatível com as especificidades do ambiente.

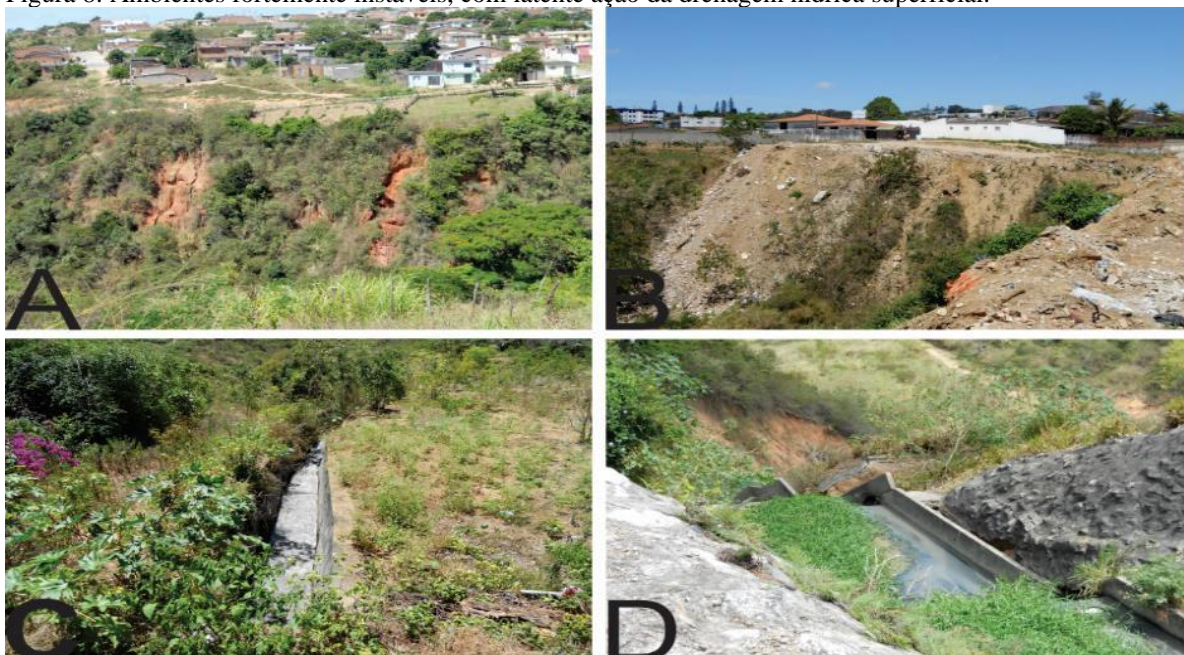
A ausência de um planejamento que se adeque a geomorfologia do ambiente materializa uma série de problemas dentre eles o risco geomorfológico, que possui relações intrínsecas a dinâmica hídrica do ambiente, resultante de processos geo-históricos de uso e ocupação do solo.

Garanhuns em seu perímetro urbano possui uma grande escassez de sistemas de drenagem, o que agrava a predisposição de suas geoformas à erosão (Figura 8 – A e B) e movimentos de massa. Embora haja dispositivos de drenagem em algumas das geoformas mais críticas (Figura 8 – C e D) eles não são implementados de forma adequada, sendo muitas vezes subdimensionados e sem serviços de manutenção.

A expansão rápida e desordenada que tem ocorrido em muitas cidades, principalmente em países em desenvolvimento, é a grande responsável pelas transformações ambientais que muitas vezes descaracteriza o meio físico original antes mesmo da ocupação urbana. O estudo da geomorfologia urbana procura compreender até que ponto essas transformações, causadas pelo homem, podem ser responsáveis pela aceleração de certos processos geomorfológicos. (GUERRA; MARÇAL, 2010).

Conforme Huffner e Oliveira (2017), o crescimento urbano desordenado é uma realidade comum na maioria dos municípios brasileiros, fato este que gera novos desafios à governança urbana local e está fora do controle das diversas instituições e órgãos de planejamento do uso e ocupação do solo. Os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos trazem muitos danos a infraestrutura urbana existente e conseqüentemente para a sociedade (SURIBABU; BHASKAR, 2014).

Figura 8: Ambientes fortemente instáveis, com latente ação da drenagem hídrica superficial.



Fonte: Acervo do Autor, 2011

O modelo de descarte da drenagem hídrica superficial na área em questão otimiza a probabilidade de movimentos de massas nas encostas, feições essas que estão sendo utilizadas como zona de expansão da poligonal urbana, não sendo incomum residências com indicativos de rastejo e vertentes com cicatrizes de erosão e/ou evidências claras de deslizamentos recentes (Figura 9 - A, B, C e D).

Figura 9: População de baixa renda fixada nas bordas de vertentes fortemente instáveis.



Fonte: Acervo do Autor, 2011.

Os fenômenos supracitados tornam essas feições em ambientes de alto risco geomorfológico e colocam a população em risco de vida. A problemática se agrava nas poligonais que comportam a população de menor poder aquisitivo, devido à fragilidade das estruturas das casas e ao maior tempo de permanência nos imóveis em situação de risco. Logo, esses cidadãos em sua maioria não possuem condições financeiras para fixação de moradias em ambientes estáveis, o que amplia seu tempo de permanência nessas moradias e reduz sua capacidade de reação frente a possíveis escorregamentos e/ou fenômenos relacionados ao escoamento hídrico.

Destaca-se que em certos pontos das encostas existe a questão da utilização do fluxo hídrico superficial para as práticas de agricultura de subsistência. Tais práticas podem vir a intensificar os processos erosivos em virtude da utilização do escoamento superficial e da reestruturação da vertente para possibilitar o cultivo.

A análise de risco envolve as mais diversas variáveis como sociais, ambientais e econômicas. Para cada uma delas ainda existe a questão temporal, pois, uma determinada

variável pode apresentar distintos graus de risco com o transcorrer do tempo. O risco de movimentos de massa em uma encosta ocupada e com elevada amplitude topográfica, é constante no decorrer do dia e agravada no transcorrer do tempo, em virtude dos dejetos lançados na encosta oriundos da ocupação humana (MELO; SOUZA, 2016).

No que tange à percepção da população em relação à instabilidade desses ambientes, as principais medidas para contenção das encostas são: utilização de restos de materiais oriundos da construção civil e solos oriundos de outras encostas. Contudo, tais medidas são ineficazes e acabam gerando problemas como: soterramentos de nascentes nos fundos dos vales, assoreamento dos corpos hídricos superficiais, agravamento da estabilidade das feições devido à sobrecarga e mudanças no perfil dos solos.

As regiões urbanas devem assumir uma maior responsabilidade em motivar e implementar soluções que consideram as profundas conexões dos seus impactos e da sua existência com o resto do planeta (SEITZINGER *et al.*, 2012).

Mesmo com essa percepção, uma parcela da população não dá a devida atenção ao problema e em muitos casos utilizam medidas de solução claramente equivocadas, como no caso do Vale da Liberdade, onde foi escavada uma trincheira em sua encosta leste que supostamente agiria como dispositivo de drenagem (Figura 10A). Vale salientar que embora haja ocorrência esporádica de movimentos de massa na região, o despejo inadequado de resíduos, a ocupação no meio da vertente e as práticas de agricultura ainda são atividades corriqueiras na referida área (Figura 10 – B, C e D).

Figura 10: Efeitos das ações antrópicas no Vale da Liberdade em Garanhuns – PE.



Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Em relação às ações do poder público na tentativa de mitigação dos efeitos resultantes dos deslocamentos de corpos hídricos superficiais, as medidas são basicamente de transferência do problema para outras áreas, que apresentam uma maior capacidade de absorção do fluxo e com menor grau de ocupação antrópica (Figura 11 - A, B, C e D). O que deixa evidente o fato de que o planejamento urbano não é sinônimo de mitigação dos problemas geoambientais, pois, nem sempre as especificidades dos ambientes são levadas em consideração.

Figura 11: Desvio de fluxo hídrico superficial para fundo de vale com menor grau de ocupação antrópica.



Fonte: Acervo do Autor, 2014.

A impermeabilização do solo exerce um papel crucial para ampliação da força de arrasto da água, de forma que um ambiente considerado estável ou intergrade em um determinado intervalo temporal, pode vir a se tornar fortemente instável em questão de minutos, condição essa atrelada à saturação do solo pela precipitação. Conforme Budhu (2010) a água é um dos agentes erosivos que continuamente erodem o maciço, alterando sua geometria e podendo acarretar ruptura do maciço. De meados de setembro ao fim de dezembro ocorre o período mais seco, de janeiro a abril o volume pluviométrico vai se ampliando paulatinamente, no quadrimestre de maio a agosto, ocorre o ápice do período chuvoso com precipitações que excedem os 120 mm (MELO, 2016).

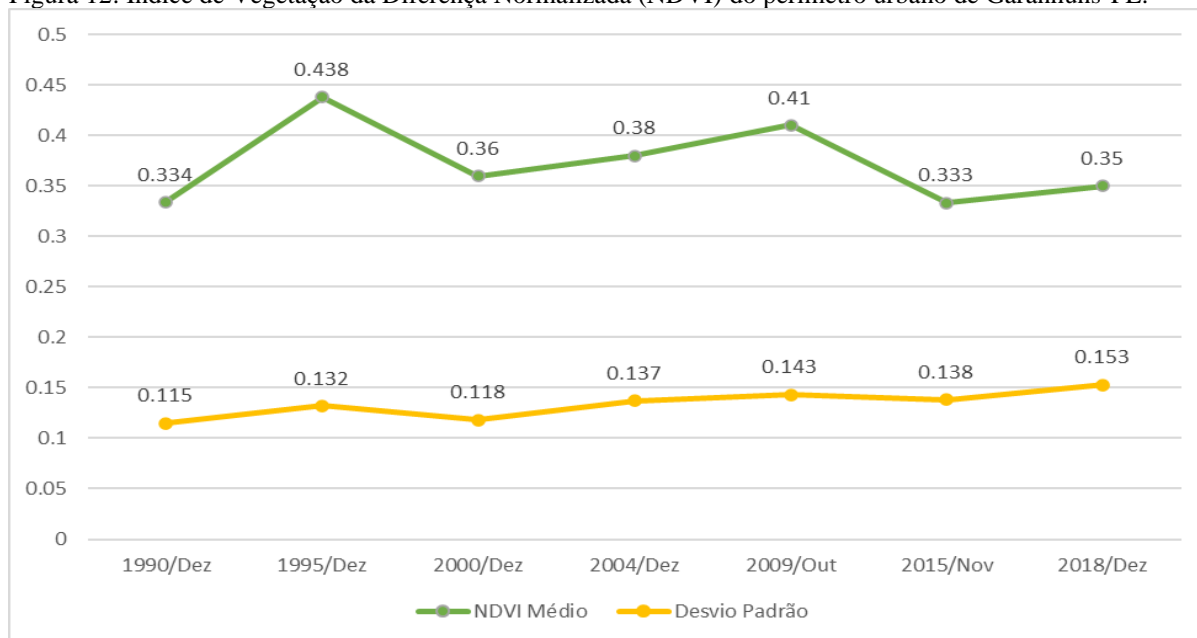
Considerando os dados supracitados, fica evidente que o risco geomorfológico no sítio urbano não é fixo, tendo sua intensidade atrelada aos efeitos da variável água, principalmente quando os resultados da modelagem do risco geomorfológico apontaram alto risco para as encostas quando o solo se encontra saturado.

Áreas urbanas possuem uma combinação de características que as tornam responsáveis por problemas ambientais em escala global, assim como as deixam vulneráveis aos impactos ambientais locais e globais (MESQUITA; BURSZTYN, 2018). Portanto, destaca-se a forte influência da pluviosidade na ampliação de áreas instáveis, com destaque para os eventos pluviais intensos e o relevo fortemente acidentado, que além de gerar áreas com elevada instabilidade, ocasiona vulnerabilidade para a população que habita esses espaços.

5.2 Análise do NDVI de Garanhuns

A Figura 12 consiste no resultado da aplicação da Equação do NDVI no modelado do relevo de Garanhuns (Figura 5, p. 30), contendo os valores médios e o desvio padrão.

Figura 12: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) do perímetro urbano de Garanhuns-PE.



Fonte: Adaptado de Landsat 5 e Landsat 8.

Observa-se nos valores acima que o NDVI médio do perímetro urbano e adjacências não apresenta uma tendência de queda, o que seria o esperado para uma região em constante expansão urbana. Todavia, há uma clara tendência de aumento do desvio padrão do NDVI, que aumentou 33,04% entre 1990 e 2018.

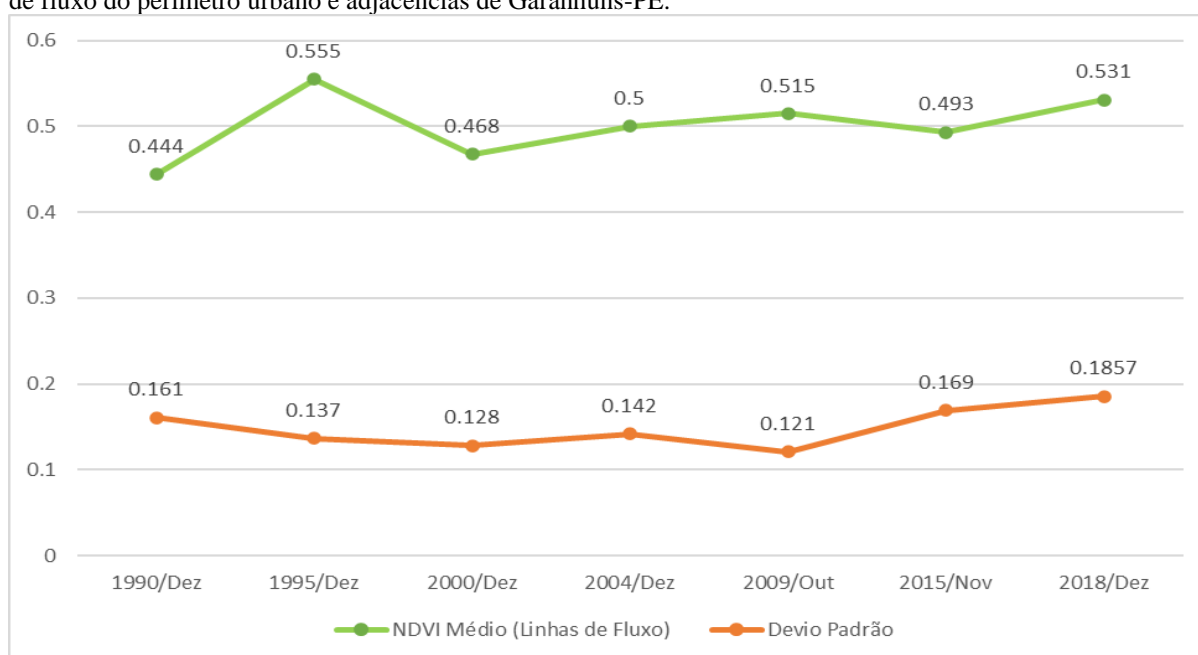
Conforme Deus *et al.* (2015), a mancha urbana de Garanhuns cresceu 20,4% no período 1990-2000 e 27,8% no período 2000-2010. Para Soares e Troleis (2018) o crescimento urbano em Garanhuns foi agravado nos anos 2000 em virtude de uma expressiva expansão universitária e ao crescimento do setor de serviços. Melo e Almeida (2013) apontam que a cobertura vegetal da região é uma transição entre Zona da Mata e Sertão, sendo que os intensos processos de urbanização foram responsáveis por praticamente toda a remoção dessa cobertura vegetal, sobrando apenas resquícios dessa cobertura vegetal em algumas áreas do município.

Entretanto, os dados sugerem que o crescimento da malha urbana não acarretou uma redução na vegetação média região. Esse fenômeno pode indicar um desequilíbrio do ecossistema natural provocado pelas mudanças realizadas na paisagem.

O aumento do desvio padrão aponta mudanças na distribuição dos valores do NDVI na região. Conforme Triola (2019), esse parâmetro estatístico é uma indicação do quanto os dados estão se desviando da média, pois quanto maior for o desvio padrão, maior será a variabilidade dos dados. Sendo assim, essa alteração pode indicar que o NDVI médio está se mostrando constante, mas a distribuição não, havendo um aumento tanto na quantidade de áreas com vegetação densa quanto nas de solo exposto ou ocupado.

A Figura 13 consiste no resultado da aplicação da Equação do NDVI em uma área de 60 metros ao redor das linhas de fluxo do modelado (Figura 5, p. 30) da área de estudo, contendo os valores médios e o desvio padrão.

Figura 13: Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) em uma área de 60 metros ao redor das linhas de fluxo do perímetro urbano e adjacências de Garanhuns-PE.



Fonte: Adaptado de Landsat 5; Landsat 8 e NASA 2011.

Os resultados obtidos em uma área de 60 metros ao redor das linhas de fluxo do modelado, indicam um NDVI médio maior que do a média da região como um todo. Essa discrepância é atribuída a maior disponibilidade de escoamento superficial nessas áreas. Observa-se que há uma tendência de crescimento do NDVI médio, tendo um aumento de 19,59% no período 1990-2018.

O desvio padrão apresentou uma tendência de queda no período 1990-2009 e um crescimento de 52,89% entre 2009 e 2018. Essa fase de alta, coincide com o estabelecimento de diversos condomínios fechados nos arredores do sítio urbano que iniciou um processo agressivo de impermeabilização do solo para viabilizar loteamentos.

Os dados apontam que o modelo de desenvolvimento urbano aplicado em Garanhuns acarretou desequilíbrios na paisagem natural. O crescimento do NDVI médio nas áreas próximas às linhas de fluxo indica que houve uma melhoria nas condições necessárias para garantir a reprodução da cobertura vegetal. Entretanto, o desvio padrão narra um cenário onde há um crescimento da dispersão da vegetação, indicando que embora o crescimento urbano esteja criando regiões de solo exposto ou ocupado, ele também está criando um cenário de prosperidade nas regiões de fluxo natural.

Esse fenômeno da distribuição do NDVI na expansão urbana em Garanhuns pode ser explicado pela dinâmica de sua drenagem urbana. Naturalmente, as comunidades se assentam próximas aos cursos d'água e em virtude da ausência de um sistema adequado de drenagem urbana, o fluxo do escoamento superficial acaba sendo redirecionado em direção às vertentes. Esse cenário não gera mudanças significativas na vegetação média, mas sim na distribuição, tendo em vista que o crescimento urbano remove a vegetação e redireciona o fluxo para outras áreas, criando regiões ausentes de cobertura vegetal e outras com vegetação densa.

A distribuição da cobertura do solo pode ser observada em diferentes microbacias no sítio urbano de Garanhuns, como na Vila Maria onde é possível observar que a vegetação vai ficando mais densa ao longo do curso d'água, criando um contraste entre o topo (Figura 14 – A e B) e o fundo do vale (Figura 14 – C e D).

Figura 14: Microbacia da nascente Vila Maria.



Fonte: Acervo do Autor, 2019.

A ocupação das encostas também contribui para os desequilíbrios na distribuição do NDVI. As edificações no topo do da Vale da Liberdade evidenciam a dispersão na cobertura do solo, onde a expansão urbana gerou áreas ausentes de vegetação e outras com vegetação densa (Figura 15 – A e B). Esses distúrbios na paisagem são intensificados pelo descarte inadequado de esgoto pluvial (Figura 15 – C e D), agravando os efeitos dos agentes erosivos na encosta criando um cenário de risco geomorfológico e possibilitando a propagação de doenças de veiculação hídrica.

Figura 15: Topo do Vale da Liberdade.



Fonte: Acervo do Autor, 2018.

O crescimento desordenado do sítio urbano em torno das encostas reflete a aplicação de um planejamento urbano que não leva em consideração os limites do meio ambiente. É comum a ocupação em áreas de risco como nas encostas do Vale da Liberdade (Figura 16A) e a aplicação de técnicas de agricultura (Figura 16B). Conforme Azambuja e Corrêa (2015) a associação de técnicas agrícolas inadequadas às altas declividades, sobretudo em locais onde há uma tensão entre o espaço de uso urbano e rural, pode ter sido responsável pela exposição de solos sobre encostas, proporcionando instabilidade ao ambiente do sítio urbano de Garanhuns.

Figura 16: Ocupação em área de risco e práticas de agricultura no Vale da Liberdade.



Fonte: Acervo do Autor, 2016.

O modelo de drenagem do escoamento superficial aplicado na região consiste no despejo inadequado do fluxo diretamente nas vertentes, intensificando os efeitos dos agentes erosivos. Consequências dessa dinâmica podem ser observadas em diferentes microbacias, como na Vila Maria onde, conforme Soares (2015) o descarte inadequado do esgoto pluvial no topo da vertente, originou uma voçoroca de 300 metros de comprimento com pouco mais de 7 metros de profundidade na referida localidade. Azambuja e Corrêa (2015), através de um mapeamento morfodinâmico de Garanhuns, constataram que a adoção de técnicas inadequadas de construção, infraestrutura deficiente e retirada de cobertura vegetal em áreas de cabeceira tem condicionado o aumento de processos erosivos em nível local.

Os vestígios de erosão hídrica evidenciam uma intensificação do escoamento superficial ocorrendo em diferentes pontos da bacia hidrográfica da região. Essa alteração na dinâmica hídrica contribui para o comportamento da distribuição do NDVI criando áreas com alto fluxo e outras impermeáveis ou com baixo fluxo. Esse cenário, originado por ações antrópicas,

configura um cenário de risco geomorfológico ao desestabilizar as encostas que se encontram ocupadas e intensificar processos erosivos.

Os desequilíbrios na distribuição da vegetação deixam seções das encostas desprotegidas o que pode acarretar movimentos de massa e sedimentação das nascentes. Essa dinâmica do crescimento da cobertura vegetal é sintoma de um modelo de desenvolvimento incompatível com os limites do ecossistema local e conforme Li *et al.* (2020), mudanças climáticas e urbanização são os principais fatores que podem alterar os processos de crescimento da vegetação no ambiente urbano.

5.3 Microbacia da nascente Vila Maria

De acordo com Soares (2015) a Nascente Vila Maria está localizada próxima ao centro comercial de Garanhuns e suas adjacências foram ocupadas em virtude da facilidade em se obter água abundante e gratuita. Ainda conforme o Autor, a nascente sofre constantemente com o descarte inadequado de esgoto na região e mesmo em face da contaminação o seu fluxo é utilizado para abastecer uma lavanderia comunitária construída na década de 1950 pelo governo municipal.

Conforme Silva (2012) a Nascente Vila Maria sempre foi consagrada como a segunda fonte mais importante da cidade de Garanhuns, superada apenas pela nascente Serra Branca e de acordo com Rego (1987 *apud* Silva, 2012) a qualidade do fluxo contínuo oriundo da Nascente Vila Maria teve uma grande influência na história do município.

A partir das visitas ao local, constatou-se a existência de indicadores de processos erosivos intensos (Figura 17A) que formaram uma voçoroca considerável na região da nascente. Conforme Soares (2015) essa voçoroca possui 300 metros de comprimento com pouco mais de 7 metros de profundidade, e teve origem em função do descarte inadequado de esgoto pluvial no topo da vertente. A visita técnica constatou que o dispositivo de drenagem (canaleta) responsável pelo descarte foi desativado (Figura 17B) recentemente pela atual gestão pública.

Contudo, somente cessar o descarte inadequado não é o suficiente, o governo municipal não implementou medidas para recuperação do dano causado. Em consequência, ao longo dos anos o estado de má gestão da problemática irá agravar a degradação hídrica da nascente, de modo a contribuir para a sua sedimentação. Além disso, não há um monitoramento da microbacia visando impedir que as residências despejem seus resíduos diretamente na vertente.

O fluxo da nascente é coletado por uma galeria que o direciona ao longo da vertente, havendo uma bifurcação para alimentação da lavanderia comunitária (Figura 17 – C e D). O

fluxo é então conectado ao esgoto pluvial da região e descartado no fundo da vertente. Observa-se que a água da nascente não é adequadamente aproveitada pelo município e conforme Soares (2015) o seu fluxo, acaba sendo contaminado pelo esgoto pluvial agravado pela ausência de saneamento que encoraja os moradores a conectarem o esgoto residencial na rede pluvial.

Figura 17: Voçoroca, canaleta desativada, lavanderia comunitária, esgoto pluvial.

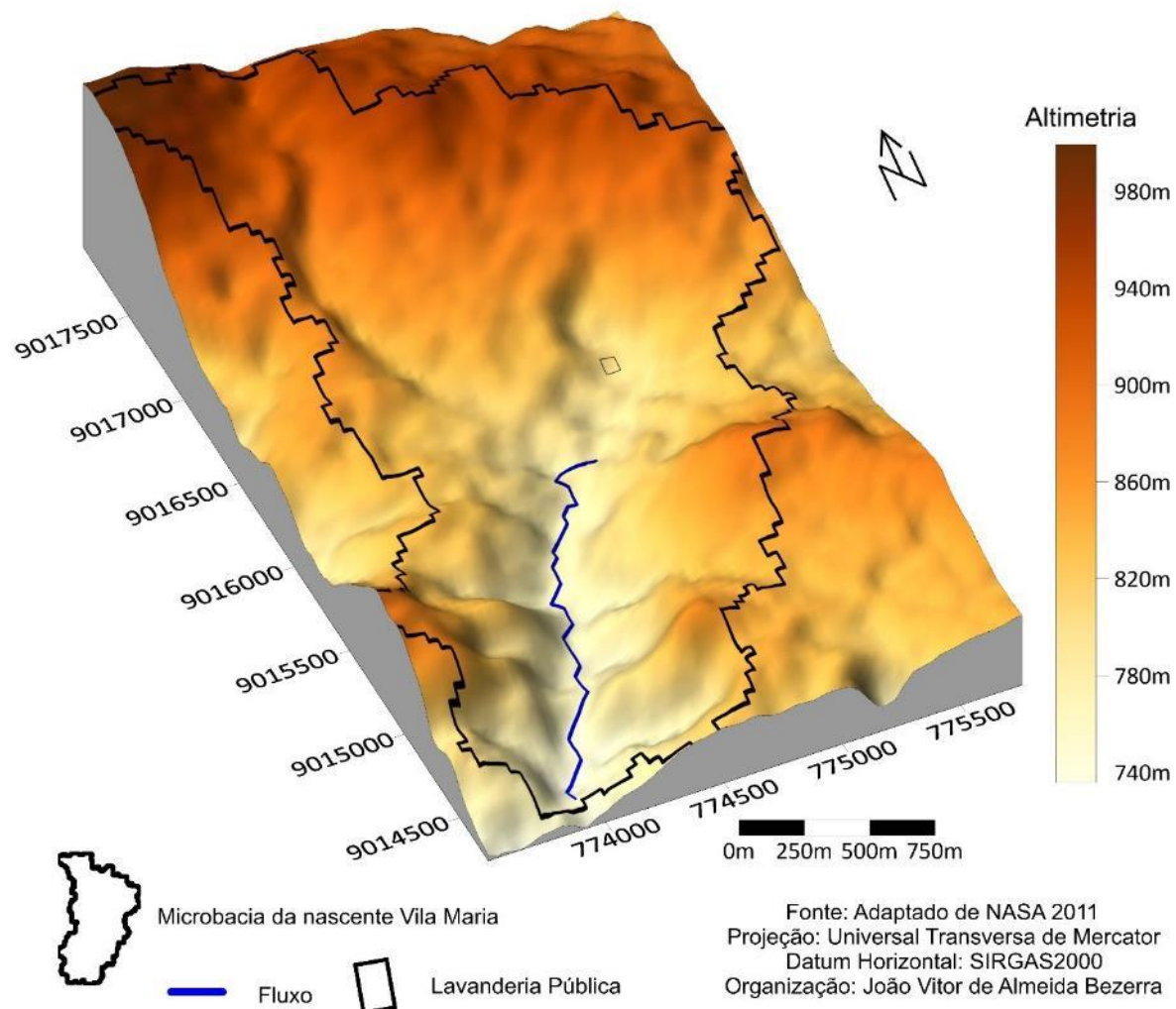


Fonte: Acervo do Autor, A 2021; B, C e D 2019.

Em relação ao regime de água, a partir das visitas ao local foi possível constatar que a nascente possui fluxo contínuo, que conforme Calheiros *et al.* (2009), é uma característica de nascentes perenes.

A Figura 18 consiste em um modelado da microbacia da nascente Vila Maria, contendo indicadores para a localização da lavanderia pública do local e para o direcionamento do escoamento superficial da microbacia. O modelo indicou que a área superficial da microbacia é de aproximadamente 4,92 km².

Figura 18: Modelado da microbacia da nascente Vila Maria e adjacências.



Fonte: Adaptado de NASA 2011.

A Tabela 1 consiste nos resultados do mapeamento da declividade do modelado da microbacia da Nascente Vila Maria classificado conforme EMBRAPA (2013).

Tabela 1: Classificação da declividade da microbacia da nascente Vila Maria conforme EMBRAPA (2013).

Declividade (°)	Relevo	% da Área
0-3	Pleno	8,20
3-8	Suave Ondulado	43,22
8-20	Ondulado	47,26
20-45	Forte Ondulado	1,32

Fonte: Adaptado de NASA 2011 e EMBRAPA 2013.

A declividade média obtida pela modelagem do relevo foi de 8,44° e conforme a Tabela 1 a região é considerada ondulada. Observa-se que existe uma parcela substancial de relevo

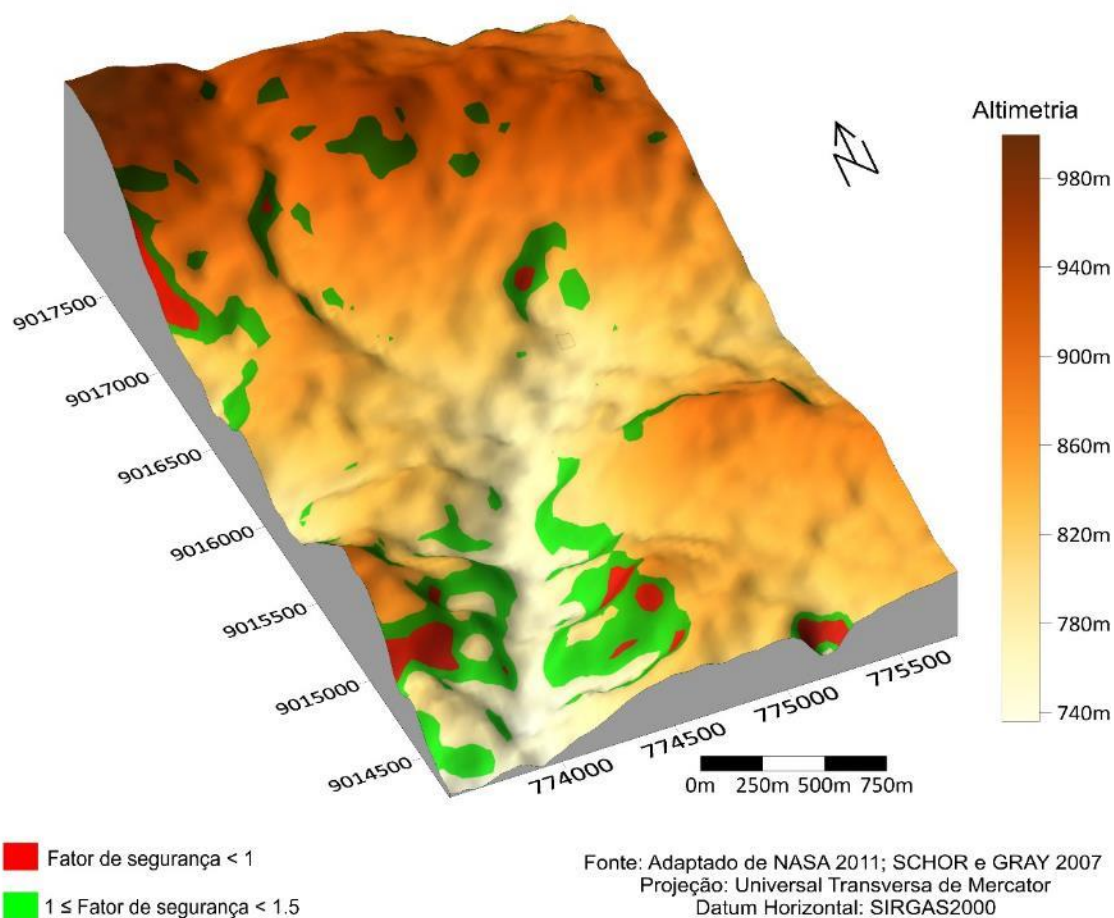
forte ondulado que consiste em 64.944 m². Para Mendes (2006) áreas com alta declividade são mais afetadas pela erosão, em decorrência do aumento da velocidade de escoamento superficial.

A infiltração de água oriunda do escoamento superficial aumenta a poropressão do solo em áreas de alta declividade e diminui sua estabilidade (HAUGEN, 2017). Essa diminuição da estabilidade, aumenta a susceptibilidade do relevo inclinado de sofrer movimentos de massa que por sua vez contribuem para a sedimentação da nascente podendo contaminar e/ou alterar a vazão da nascente.

A inclinação da microbacia contribui para que a nascente possua uma alta velocidade de escoamento que junto ao regime contínuo de fluxo, garante um volume abundante e constante na lavadeira pública da região.

A Figura 19 consiste no resultado da modelagem da estabilidade da microbacia da nascente Vila Maria considerando o solo como saturado.

Figura 19: Estabilidade da microbacia da nascente Vila Maria e adjacências.



Fonte: Adaptado de NASA 2011; SCHOR e GRAY 2007.

O modelo de estabilidade evidenciou que na condição de solo saturado para a microbacia, sem considerar as adjacências, 91.512 m² (1,86% do total) passariam a ter um Fator de Segurança menor que 1, indicando ruptura iminente do maciço. 715.368 m² (14,54% do total) teriam um FS menor que 1,5 que é o valor mínimo exigido pela NBR 11682 (ABNT, 2006) para que seja garantido um grau de segurança alto para as encostas. Vale salientar que movimentos de massa afetam toda área ao seu redor, ou seja, caso o fenômeno ocorra na região instável as suas adjacências podem se tornar instáveis também.

Na região instável, próxima à lavanderia pública indicada pela Figura 19 (FS < 1) está localizada a voçoroca (Figura 20A) da nascente Vila Maria, fato que evidencia a eficácia do modelo. Enquanto que, nas regiões com FS menor que 1,5 estão localizadas diversas construções que foram estabelecidas diretamente no topo da vertente (Figura 20B).

Embora o local ainda possua resquícios de cobertura vegetal, uma parcela expressiva da vertente encontra-se com o solo exposto (Figura 20C), especialmente em virtude dos aterros que ocorreram na área e do acúmulo de resíduos no topo da encosta, especialmente aqueles oriundos da construção civil. Além disso, foram observadas práticas de queima da cobertura vegetal ao longo da microbacia assim como o acúmulo de resíduos no solo (Figura 20 – B e D).

Figura 20: Ocupação no topo da encosta, vegetação afetada por aterros, queimada da vegetação, voçoroca.



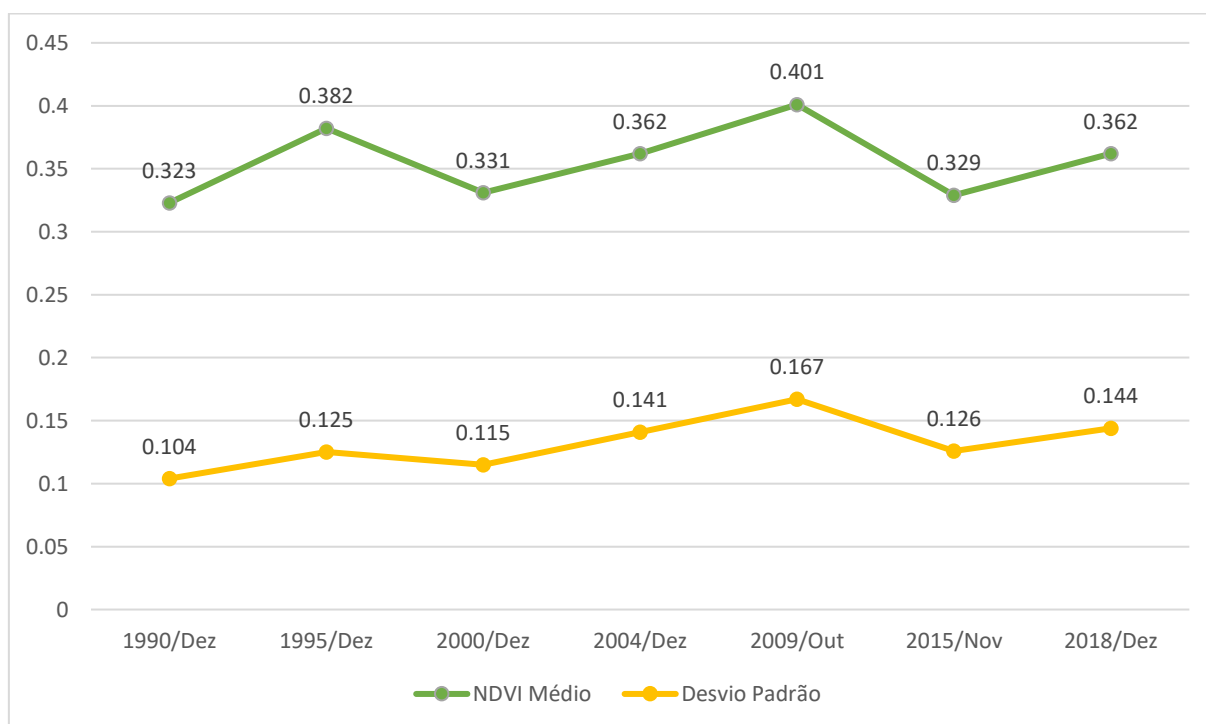
Fonte: Acervo do Autor, A e C 2021; B e D 2019.

Conforme Mendes *et al.* (2017), encostas localizadas em ambientes urbanos são frequentemente afetadas por processos antropogênicos como cortes, aterros, vazamento de canalizações e despejo de águas residuais. Sendo assim, o alto grau de urbanização no topo da encosta além de criar uma sobrecarga, gera um cenário de risco geomorfológico onde a comunidade da região pode afetar diretamente a estabilidade da vertente, principalmente quando se considera a infraestrutura precária de saneamento básico da região.

5.3.1 NDVI da microbacia da nascente Vila Maria

A Figura 21 consiste no resultado do cálculo do NDVI para a microbacia da nascente Vila Maria, contendo valores médios e o desvio padrão.

Figura 21: NDVI da microbacia da nascente Vila Maria.



Fonte: Adaptado de Landsat 5 e Landsat 8.

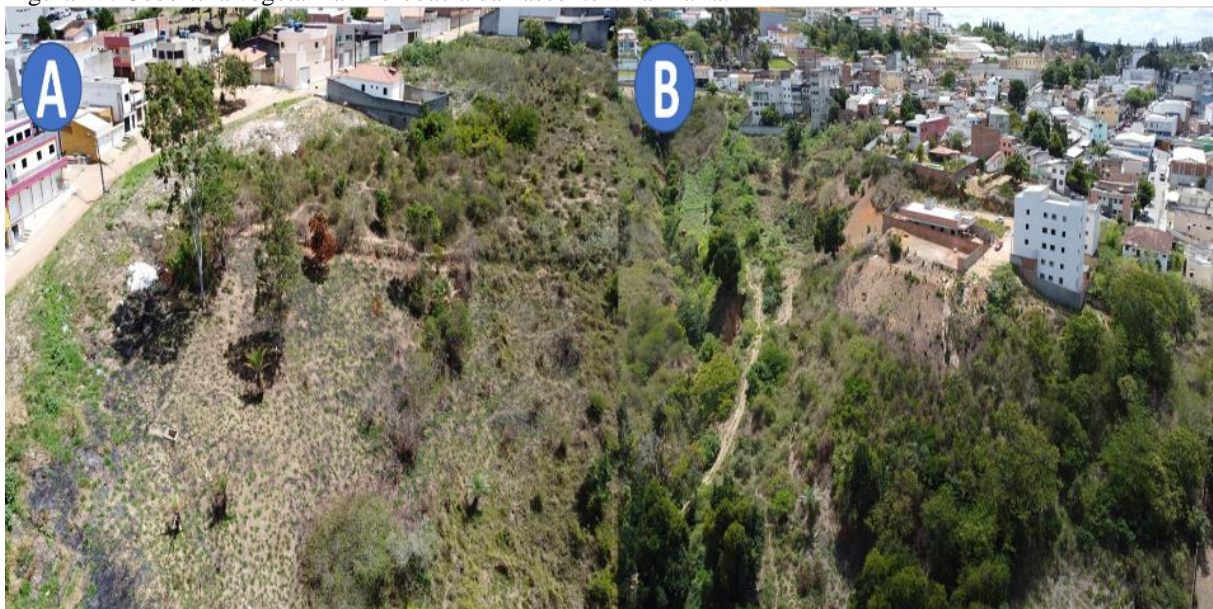
Observa-se na Figura 8 valores médios baixos calculados para o NDVI. A microbacia da Nascente Vila Maria é uma área urbanizada cuja expansão é realizada a partir da remoção da cobertura vegetal para possibilitar assentamentos. Esse crescimento explica os baixos valores médios do NDVI. Entretanto a média se manteve relativamente constante entre 1990 e 2018, o que é inesperado para uma região em constante expansão urbana.

Houve um aumento de 60,57% no desvio padrão entre 1990 e 2009 indicando uma mudança drástica na distribuição da cobertura vegetal da região. A medida em que a poligonal urbana expande, a demanda por serviços de drenagem superficial aumenta de forma considerável. Porém, os sistemas não são implementados de forma correta e acabam despejando o fluxo em sentido as vertentes da microbacia.

Conforme Deus *et al.* (2015) e Soares e Troleis (2018), o crescimento urbano da malha urbana de Garanhuns foi impulsionado nos anos 2000. Observa-se pelos resultados do NDVI da microbacia da nascente Vila Maria que entre os anos 2000 e 2009 houve uma profunda alteração na dispersão da vegetação e um aumento do NDVI médio. Durante esse intervalo temporal houve uma forte expansão urbana intensificada pela especulação imobiliária e pela expansão universitária. Esse crescimento levou a criação de diversos loteamentos e a consequente remoção da cobertura vegetal e modificação da dinâmica de escoamento superficial da região.

Portanto, assim como foi observado na análise para o NDVI de Garanhuns como um todo, existem indícios de que embora a expansão urbana remova a cobertura vegetal, ela é acompanhada por um redirecionamento do fluxo para o fundo da microbacia criando regiões de solo exposto ou vegetação rasteira (Figura 22A) e outras de vegetação densa (Figura 22B).

Figura 22: Cobertura vegetal na microbacia da nascente Vila Maria.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

Esse fato reforça o argumento da expansão urbana estar contribuindo para a cobertura vegetal localizada no fundo da microbacia ao realizar o descarte inadequado do esgoto pluvial.

Conforme Kaspersen *et al.* (2015), a extensão e localização de zonas impermeáveis nas áreas urbanas afetam de forma considerável o volume e a velocidade do escoamento superficial durante chuvas intensas. Em suma, o efeito da impermeabilização causado pela expansão da poligonal urbana também pode ter contribuído para o aumento das médias de NDVI nas épocas chuvosas ao intensificar o escoamento superficial.

Considerando que conforme Durigon *et al.* (2014), valores de NDVI próximos a 1 indicam cobertura vegetal densa, os valores médios obtidos para a área da microbacia indicam uma baixa densidade de vegetação. Para Schor e Gray (2007), a cobertura vegetal pode promover um aumento da resistência do solo e traz grandes benefícios para as encostas ao protegê-las contra processos erosivos.

Melo (2013) aponta que a poligonal urbana de Garanhuns está se expandido em direção às encostas instáveis do seu relevo em virtude da falta de áreas adequadas para assentamento. Para Soares e Troleis (2018) a expansão urbana em Garanhuns ocorre majoritariamente de forma não planejada frequentemente desrespeitando a legislação e os aspectos ambientais fundamentais, tal como a declividade das encostas e as áreas das nascentes. A expansão urbana de Garanhuns sobre as áreas de encostas, ocorreu em concomitância a um forte evento de estiagem no ano de 1982, e conduziu a tipos de ações antrópicas extremamente nocivas aos sistemas naturais do período (AZAMBUJA; CORRÊA, 2015).

A dinâmica de distribuição da população no espaço urbano é regida fundamentalmente pelo “valor do solo”. O espaço urbano de Garanhuns é fortemente condicionado à sua morfologia, relevo, solo e eixos viários. Fato esse que leva as populações de baixa renda a se instalarem em locais de qualidade inferior, seja em relação às edificações, seja na infraestrutura instalada (AZAMBUJA; CORRÊA, 2015).

Em suma, a degradação das nascentes urbanas em Garanhuns se caracteriza como um cenário de risco geomorfológico, onde a população mais carente, por falta de escolha, ocupa vertentes instáveis e no processo de assentamento acabam removendo a cobertura vegetal e despejando seus resíduos ao longo da vertente. Essas ações, além de contaminarem a nascente e possibilitarem a propagação de doenças de veiculação hídrica, contribuem para a intensificação dos processos erosivos aumentando o risco de movimentos de massa que por sua vez causam sedimentação nas nascentes, comprometendo assim a sua vazão.

A declividade acentuada e o NDVI obtido para a microbacia da Nascente Vila Maria, com valores médios de baixa magnitude, agem como indicadores que vão de acordo com a fragilidade social complexa supracitada. Isso se deve ao fato de que os valores confirmam uma impermeabilização do solo em locais de encosta.

Vale salientar que embora o NDVI seja um bom indicador da cobertura vegetal, ele por si só não garante uma análise real do fenômeno. Além disso, somente o aumento da cobertura vegetal não é sinônimo da mitigação do risco geomorfológico, principalmente quando se considera que o aumento do NDVI da microbacia em estudo, pode estar atrelado à condicionais nocivas ao meio ambiente como o descarte inadequado dos sistemas de drenagem pluvial.

5.4 Microbacia da nascente Pau Amarelo

O bairro Heliópolis possui uma nascente que abastece o Rio Mundaú chamada de Pau Amarelo e está localizada no fundo do Vale da Liberdade que durante a década de 1930 até o início dos anos 1970, foi responsável pelo abastecimento de água da cidade. O uso dessa nascente foi substituído por barragens pela grande demanda dela exigida e pelo risco de contaminação em face do descarte de esgoto na região (SOARES, 2015).

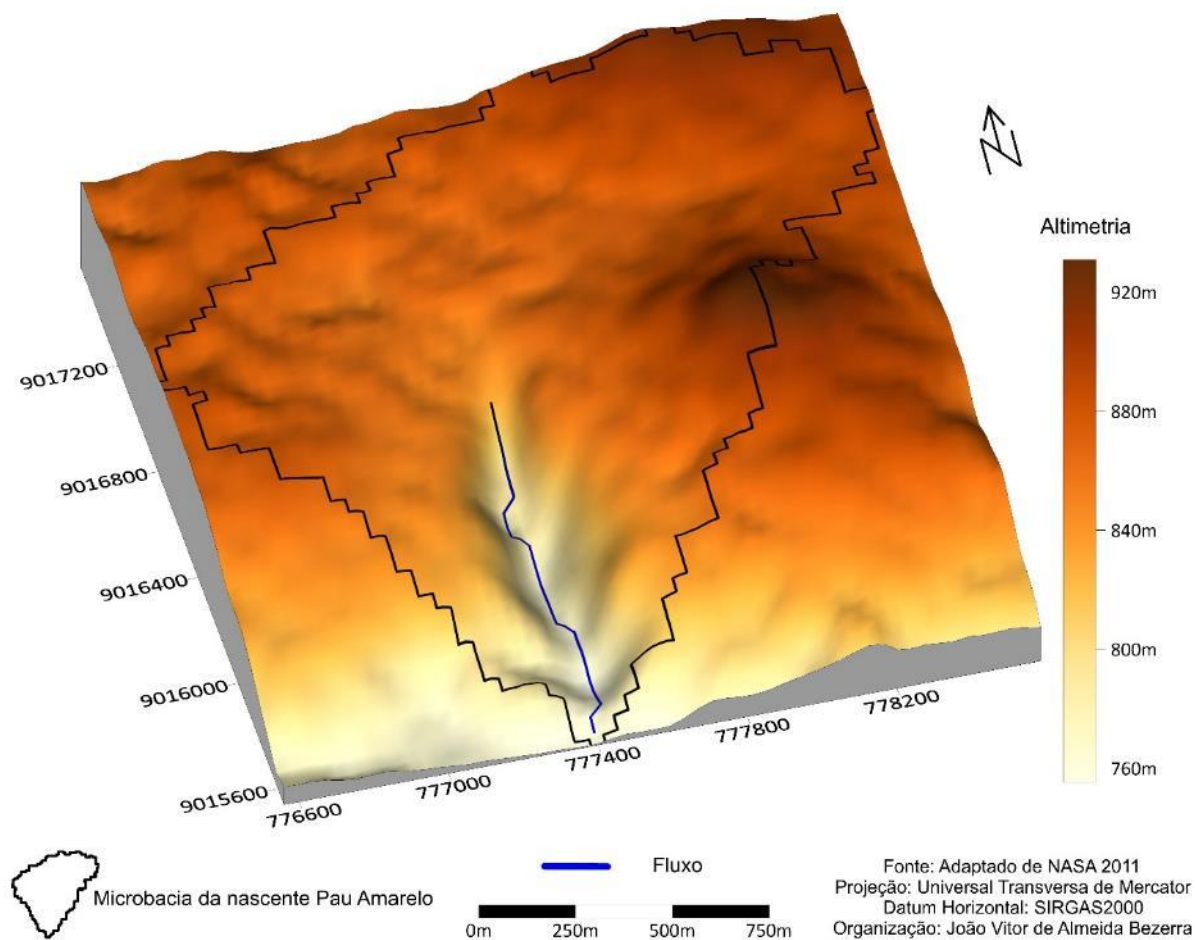
A nascente Pau Amarelo é um recurso hídrico de suma importância para Garanhuns e para os municípios da bacia do rio Mundaú e encontra-se em severas condições de degradação ambiental, sofreu impactos nas últimas quatro décadas e hoje se encontra contaminada (SOARES *et al.*, 2013). A falta de planejamento urbano aliada à geomorfologia da região fez com que a população acabasse ocupando as encostas do Vale da Liberdade.

Uma das encostas é ocupada por uma comunidade de baixa renda, denominada de Liberdade enquanto na outra residem pessoas de alto poder aquisitivo cuja denominação é homônima a do bairro. No entanto, essa subdivisão das comunidades não é reconhecida pela prefeitura que se refere à ambas as partes como bairro Heliópolis (SOARES *et al.*, 2013).

A borda leste do vale que é ocupada pela comunidade da Liberdade, tornou-se instável em virtude da retirada de cobertura vegetal nativa para ampliação do perímetro urbano sem infraestrutura adequada. Enquanto na borda oeste, que é ocupada por uma população de alto poder aquisitivo, o modelo de ocupação do solo ocorre de maneira mais estruturada (MELO; ALMEIDA, 2013).

A Figura 23 representa o mapeamento topográfico da microbacia da nascente Pau Amarelo que resultou em um modelo 3D da área e suas adjacências. Observa-se que o Vale da Liberdade é uma área muito íngreme na microbacia, que foi formada ao longo do tempo, em decorrência de processos erosivos intensos agravados pelo descarte inadequado de resíduos e pela ineficiência da drenagem urbana na área. A área superficial total da microbacia, excluindo suas adjacências, foi de 2,162 km².

Figura 23: Modelado do Vale da Liberdade e adjacências.



Fonte: Adaptado de NASA, 2011.

O modelo indicou que a microbacia da nascente Pau Amarelo, excluindo suas adjacências, possui uma declividade máxima de 28,9 ° e média de 6,91 °. A Tabela 2 consiste nos resultados do mapeamento da declividade do modelado da microbacia da nascente Pau Amarelo classificado conforme EMBRAPA (2013).

Tabela 2: Classificação da declividade da microbacia da nascente Pau Amarelo conforme EMBRAPA (2013).

Declividade (°)	Relevo	% da Área
0-3	Plano	20,84
3-8	Suave Ondulado	51,25
8-20	Ondulado	22,96
20-45	Forte Ondulado	4,95

Fonte: Adaptado de NASA 2011 e EMBRAPA 2013.

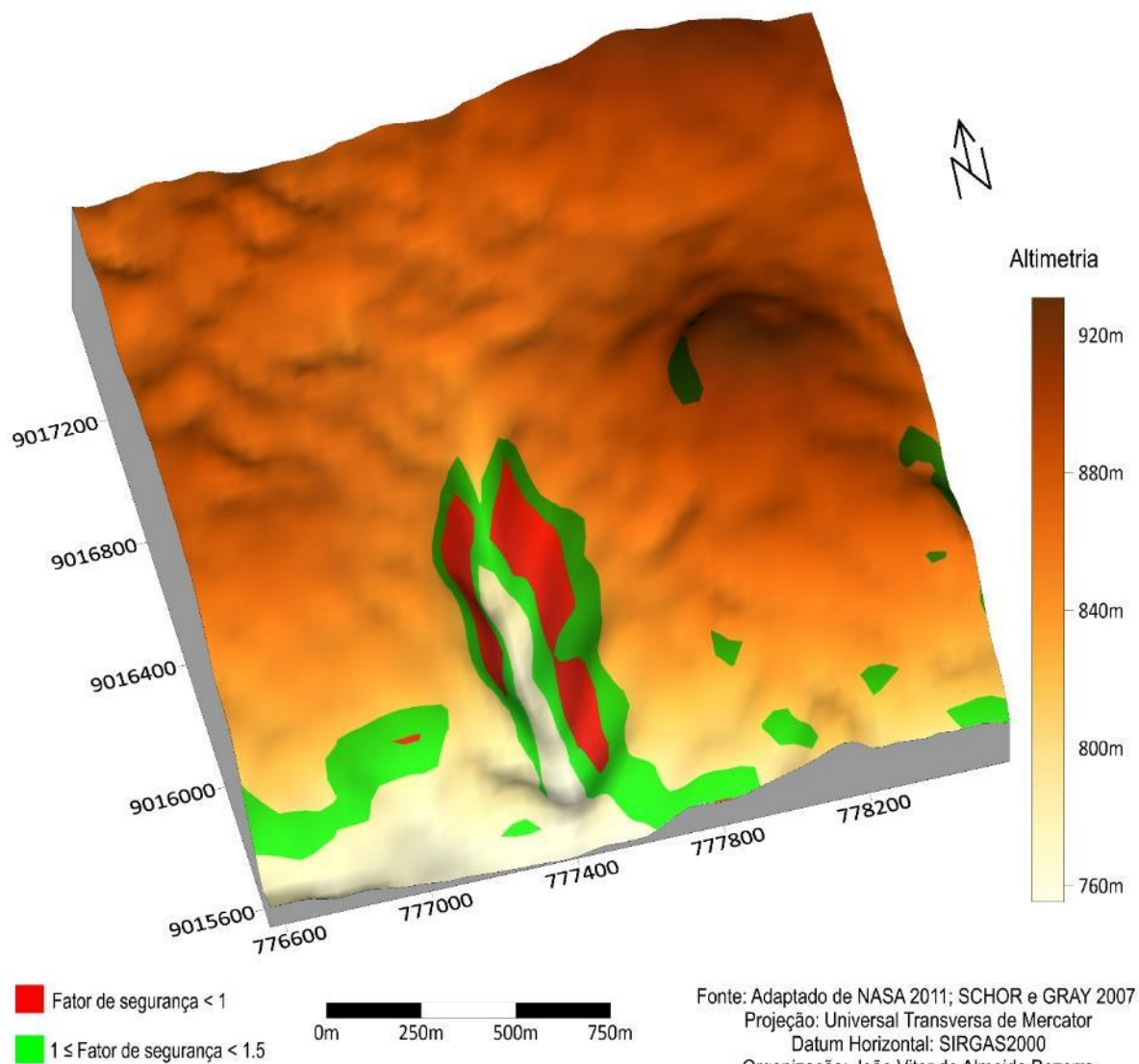
A região é considerada suave-ondulada, porém, observa-se que existe uma parcela substancial de relevo ondulado (496.395,2 m²) e forte ondulado (107.019 m²). Embora apenas

uma pequena parcela da região seja considerada plana, ela apresenta um alto grau de urbanização com diversas construções no topo do vale. Impulsionada pelo Vale da Liberdade, a microbacia da nascente Pau Amarelo apresentou a maior parcela de relevo forte ondulado quando comparada a microbacia das nascentes Pau Pombo e Vila Maria.

Áreas com alta declividade combinadas à ocupação humana configuram um ambiente propício a risco geomorfológico, em especial quando associado ao avanço do perímetro urbano e a ausência de drenagem. A declividade é um dos fatores de cunho geomorfológico que influencia na susceptibilidade do maciço à movimentos de massa (FERNANDES *et al.*, 2001).

A Figura 24 consiste no resultado da modelagem da estabilidade do Vale da Liberdade utilizando o método do talude infinito considerando o solo como saturado.

Figura 24: Modelagem da estabilidade da microbacia da nascente Pau Amarelo e adjacências.



Fonte: Adaptado de NASA 2011; SCHOR e GRAY 2007.

O modelo de estabilidade evidenciou que, na condição de solo saturado e excluindo as adjacências da microbacia, 108.297 m² (5,01% do total) passariam a ter um Fator de Segurança menor que 1, indicando ruptura iminente do maciço. 149.800 m² (6,93% do total) teriam um FS menor que 1,5 que é o valor mínimo exigido pela NBR 11682 (ABNT, 2006) para que seja garantido um grau de segurança alto para as encostas. Vale salientar que a área instável se localiza no Vale da Liberdade e que movimentos de massa afetam toda área ao seu redor, ou seja, caso o fenômeno ocorra as suas adjacências podem se tornar instáveis também.

Os resultados descrevem um cenário preocupante de risco geomorfológico, considerando que uma parcela considerável do Vale da Liberdade pode se tornar instável caso o solo se torne saturado. Considerando o índice pluviométrico atípico da região e o alto grau de urbanização da área, fica evidente que se trata de um cenário de risco geomorfológico.

Em junho de 2010 o município de Garanhuns foi afetado por fortes chuvas chegando a chover 80,2 mm em um único dia com um total acumulado de 374,2 mm no mês. O evento, extremamente incomum foi superior à média histórica do referido mês nos últimos vinte e um anos e causou movimentos de massa em algumas áreas do vale. Após o evento a prefeitura realocou aproximadamente 100 famílias que residiam no Vale da Liberdade cujas residências foram afetadas nos deslizamentos causados pela chuva (SOARES, 2015).

A localidade possui um claro precedente de risco geomorfológico, o evento supracitado saturou o solo e provou movimentos de massa tornando realidade o que o modelo de estabilidade previu. Os diversos vestígios de erosão (Figura 25 – A e B) e movimentos de massa encontrados são indicadores da instabilidade da região.

Figura 25: Vestígios de instabilidade nas encostas do Vale da Liberdade.



Fonte: Acervo do Autor, A 2018; B 2016.

Ambas as encostas do Vale da Liberdade são ocupadas no topo, porém na encosta leste a ocupação é mais acentuada com construções tanto no topo quanto no meio da encosta (Figura 26A). Também há vestígios de construções que foram demolidas no meio da encosta (Figura 26B). Atividades antrópicas como a ocupação de encostas agravam a erosão e contribuem para a instabilidade da área (MAGALHÃES, 2013).

Figura 26: Ocupações no meio da encosta leste e vestígios de demolição.



Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Nota-se que o Vale da Liberdade é caracterizado por sua alta declividade e má gestão de resíduos. Como discutido anteriormente, a região possui uma característica bem peculiar, pois, uma de suas encostas se encontra em uma região de menor risco social e a outra encosta se encontra em uma de maior risco. Na encosta de menor risco social (encosta oeste) há a captação e redirecionamento de águas pluviais e na de maior risco (leste), não há captação adequada e o descarte é realizado diretamente no fundo do vale (Figura 27).

Figura 27: Descarte de esgoto pluvial na área de maior risco social diretamente no fundo do vale.



Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Para Cunha (1991, *apud* ASSUNÇÃO, 2005), a ausência de sistemas de esgoto adequados resulta no lançamento de águas servidas nas encostas que por sua vez permite uma infiltração contínua do solo, podendo provocar saturação, movimentos de massa e a contaminação de recursos hídricos como nascentes.

Em face da ausência de saneamento básico, algumas residências acabam despejando seus resíduos diretamente nas vertentes ou na canalização pluvial inadequada o que acaba contaminando a nascente, ou seja, além de ter sua vazão comprometida pela sedimentação a nascente ainda corre grande risco de contaminação por esses resíduos.

Na encosta de maior risco social há uma escassez de dispositivos de drenagem pluvial (Figura 28 – A e B) fazendo com que em períodos de chuva todo o escoamento superficial desça até o fundo do vale. O fluxo de água em geral reduz o fator de segurança do talude ao aumentar o peso do solo e reduzir a sua resistência ao cisalhamento além de causar erosão (ISHIBASHI; HAZARIKA, 2015).

Figura 28: Ausência de dispositivos de drenagem nas ruas da encosta de maior risco social.



Fonte: Acervo do Autor, 2016.

Além do sistema de saneamento básico precário, o Vale da Liberdade ainda sofre com o descarte inadequado de resíduos sólidos (Figura 29) que compromete significativamente a estabilidade da região e a integridade da nascente Pau Amarelo.

Figura 29: Acúmulo de resíduos sólidos no fundo do vale.



Fonte: Acervo do Autor, 2016.

O descarte inadequado de resíduos sólidos polui e contamina as águas naturais, provoca doenças de veiculação hídrica, maus odores, geram precárias condições estéticas e de salubridade e contribuem para a obstrução e assoreamento dos canais naturais de escoamento superficial (MELO, 2013). A obstrução da drenagem contribui para a infiltração e saturação do solo aumentando a susceptibilidade à movimentos de massa o que pode acarretar contaminação e sedimentação da nascente.

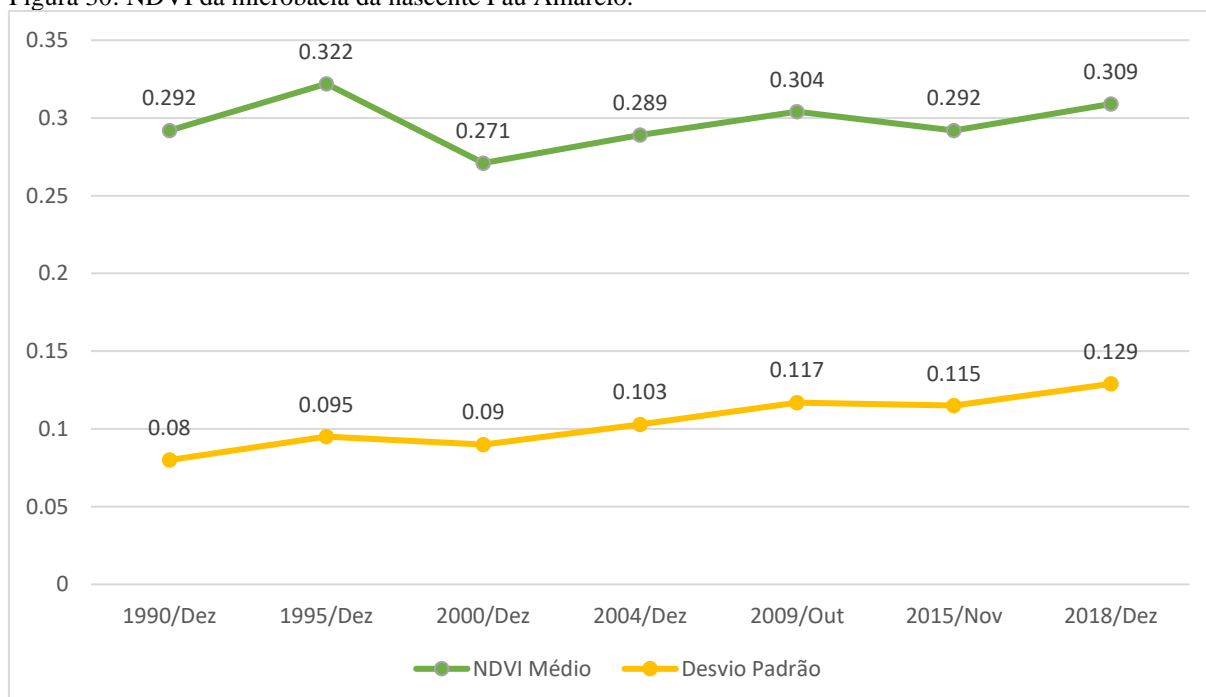
Diante da ausência de redes de coleta de esgoto, as residências recorrem à construção de fossas, mas em algumas áreas do Bairro, o descarte é feito diretamente na encosta que além de comprometer a estabilidade da região em conjunto com o acúmulo de resíduos, também compromete a vazão e integridade da nascente Pau Amarelo.

A dinâmica de ocupação do Vale da Liberdade configura um cenário de risco ambiental que põe em risco toda a comunidade que reside na região. A instabilidade do relevo, o saneamento básico precário e o constante avanço da comunidade na vertente ameaça diretamente a nascente do Pau Amarelo, comprometendo a qualidade da sua água e a sua vazão.

5.4.1 NDVI da microbacia da nascente Pau Amarelo.

A Figura 30 consiste no resultado do cálculo do NDVI para a microbacia da nascente Pau Amarelo, contendo valores médios e o desvio padrão.

Figura 30: NDVI da microbacia da nascente Pau Amarelo.

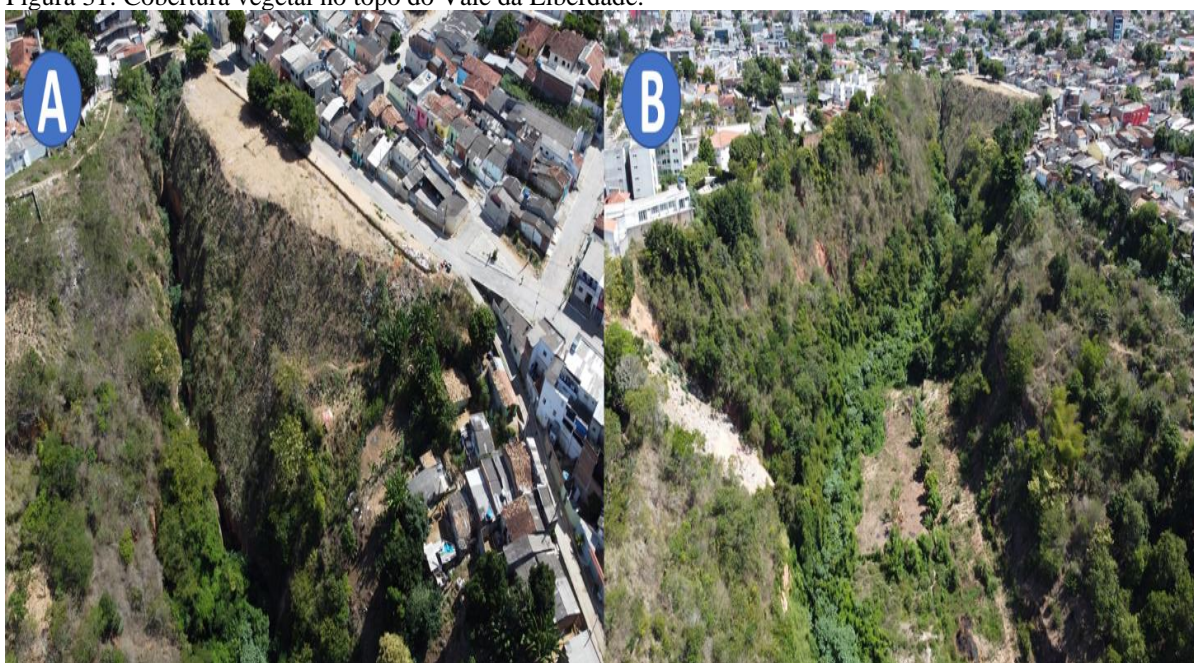


Fonte: Adaptado de Landsat 5 e Landsat 8.

Observa-se pela figura acima de que o NDVI médio da região se manteve estável entre ao nos de 1990 e 2018. Entretanto, há uma clara tendência de aumento do desvio padrão cujo valor em 2018 foi 61,25% maior que em 1990, indicando alterações na dispersão da cobertura vegetal na microbacia.

As Figura 31A e Figura 31B são do topo do Vale da Liberdade e elas evidenciam uma alta dispersão da cobertura vegetal, onde partes da encosta estão com solo exposto ou cobertura vegetal rasteira, enquanto as áreas no fundo do vale onde está localizada a nascente Pau Amarelo apresenta uma vegetação densa. Observa-se que a maior parcela de solo exposto se encontra adjacente as construções residenciais.

Figura 31: Cobertura vegetal no topo do Vale da Liberdade.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

É importante ressaltar que a microbacia da nascente Pau Amarelo é uma região que sofre constantemente com os processos de urbanização e expansão do perímetro urbano de Garanhuns. Entretanto, os valores médios de NDVI se mantiveram constantes em face desse processo, indicando distúrbios na dispersão da vegetação e do escoamento superficial.

Embora haja uma constante expansão do perímetro urbano na microbacia, ainda existem terrenos não ocupados, frutos da especulação imobiliária e expansão universitária em Garanhuns, cuja superfície encontra-se totalmente vegetada. Essas regiões contribuem para o fenômeno do desvio padrão observado na região, pois ao mesmo tempo em que existem regiões com o solo exposto em virtude da urbanização, existem outras que foram inicialmente

desmatadas durante o ato de loteamento, mas foram abandonadas em prol de especulação imobiliária, permitindo a restauração da cobertura vegetal ao longo do tempo.

A dinâmica de drenagem no Vale da Liberdade, também é um indicativo da dispersão da cobertura vegetal. Apenas a encosta oeste possui dispositivos de drenagem e na região leste a ocupação ocorre de tal maneira que todo o fluxo é redirecionado para o fundo do vale, intensificando os processos erosivos e criando regiões com fluxo abundante.

5.5 Microbacia da nascente Pau Pombo

A nascente Pau Pombo está localizada no bairro Santo Antônio, primeiro bairro da sede municipal e centro comercial da cidade. A nascente possui vazão perene e caracteriza-se por apresentar surgência difusa em área de exfiltração que envolve parte do parque Ruber van der Linden (Figura 32) e propriedades privadas (SOARES, 2015).

Figura 32: Foto aérea do Parque Ruber van der Linden onde está localizada a nascente Pau Pombo.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

A cobertura vegetal de Garanhuns é uma transição entre Zona da Mata e Sertão, sendo que os intensos processos de urbanização sem os devidos cuidados ambientais e a retirada da madeira para servir de matéria prima para padarias, madeireiras, construção civil e atividades

juninas foram responsáveis por praticamente toda remoção dessa cobertura vegetal, sendo o parque Ruber van der Linden, popularmente chamado de Pau Pombo, um dos locais onde é possível encontrar os resquícios dessa vegetação (MELO; ALMEIDA, 2013).

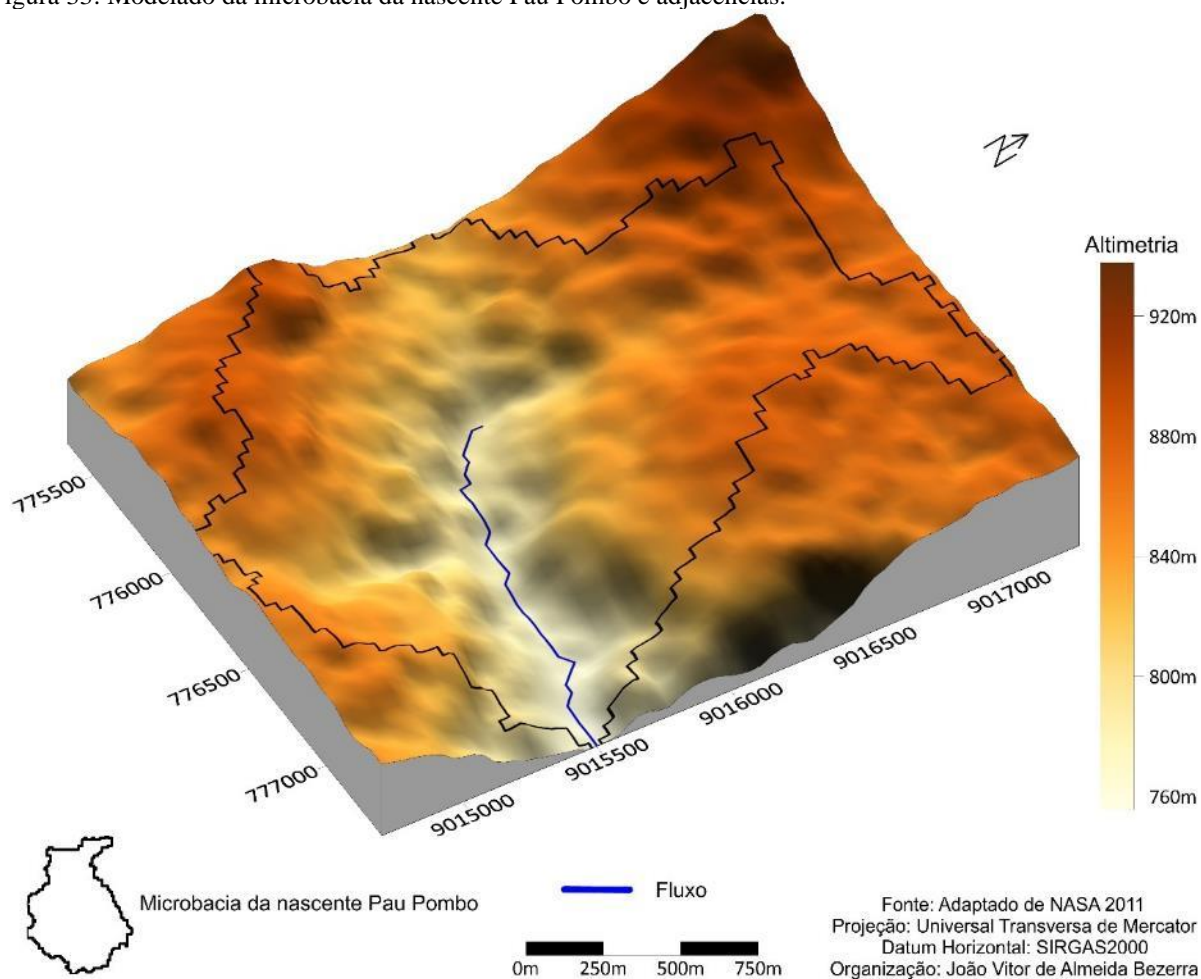
A exploração do manancial do Pau Pombo para o abastecimento de água canalizada começou em 1919, com iniciativa pioneira do Coronel José d'Almeida Filho, dono da *Empresa de Melhoramentos*, responsável pelo abastecimento de água e luz em Garanhuns. O sistema implantado não conseguiu atender satisfatoriamente à demanda da população, mesmo limitando-se apenas ao fornecimento da parcela de maior poder aquisitivo. A nascente Pau Pombo foi identificada como um símbolo do grupo social dominante, onde seus recursos eram acessados por quem podia pagar pelo uso do sistema de abastecimento mecanizado, passando a constituir uma primeira forma de territorialidade diferenciada mediada pela água, no espaço da cidade (SILVA, 2012).

O fluxo das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria foi utilizado para abastecimento por água encanada até a década de 1970 e ainda hoje formam riachos importantes para os açudes que abastecem a cidade de Garanhuns. Entretanto, elas sofrem com ocupações nas encostas onde também ocorre a supressão da vegetação, modificação e exposição do solo a processos de erosão linear que apresentam vários estágios e inclusive voçorocamentos que trazem riscos a dezenas de habitações próximas (SOARES; TROLEIS, 2018).

O entorno da nascente Pau Pombo tem sofrido com o significativo processo de ocupação ao longo do tempo, especialmente após a década de 1970. Na atualidade, o tecido urbano tem se expandido de forma rápida e intensa onde até mesmo as Áreas de Preservação Permanente - APP são alvos de empreendedores imobiliários para a construção de imóveis. Na área de APP da nascente existe a criação de animais, moradias e um banheiro público que fica dentro do Parque Ruber van der Linden, assim são fatores graves de poluição e contaminação do fluxo da nascente, uma vez que, não há rede coletora de esgoto então a destinação dos dejetos ocorre em fossas construídas nos limites da APP criando onde cenário onde locais que possuem um lençol freático muito raso há uma maior facilidade de contaminação (SOARES, 2015).

A Figura 33 consiste no resultado do mapeamento topográfico da microbacia da nascente Pau Pombo. O modelado indicou que a área superficial da microbacia é de 3,08 km².

Figura 33: Modelado da microbacia da nascente Pau Pombo e adjacências.



Fonte: Adaptado de NASA 2011.

A Tabela 3 consiste nos resultados do mapeamento da declividade do modelado da microbacia da nascente Pau Pombo, classificado conforme EMBRAPA (2013). A declividade média indicada pela modelagem do relevo foi de 6,8 ° e a máxima foi de 21,25 °.

Tabela 3: Classificação da declividade da microbacia da nascente Pau Pombo conforme EMBRAPA (2013).

Declividade (°)	Relevo	% da Área
0-3	Plano	13,74
3-8	Suave Ondulado	53,80
8-20	Ondulado	32,28
20-45	Forte Ondulado	0,18

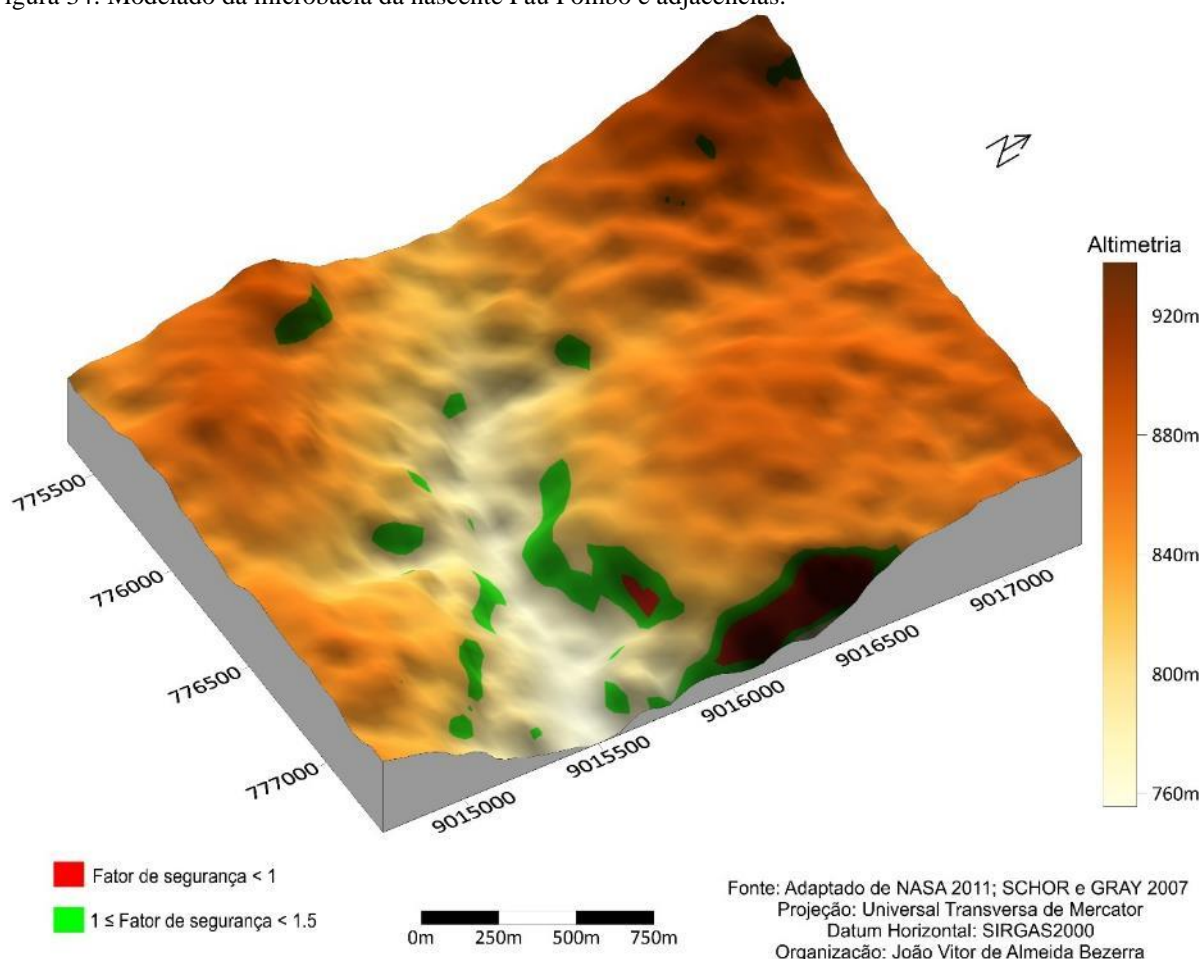
Fonte: Adaptado de NASA 2011 e EMBRAPA 2013.

Observa-se que o relevo da microbacia é predominantemente Suave Ondulado e apenas 0,18% da área (5.544 m²) é classificado como Forte Ondulado, este foi o menor percentual de área para essa classe de declividade entre as microbacias estudadas.

A microbacia Pau Pombo se encontra no primeiro bairro de Garanhuns e consequentemente possui um alto grau de urbanização. É importante destacar que uma área considerável da região foi alterada por constantes processos de terraplenagem com diversos cortes e aterros para possibilitar assentamentos urbanos.

A Figura 34 consiste no resultado da modelagem da estabilidade da microbacia da nascente Pau Pombo utilizando o método do talude infinito considerando o solo como saturado.

Figura 34: Modelado da microbacia da nascente Pau Pombo e adjacências.



Fonte: Adaptado de NASA 2011; SCHOR e GRAY 2007.

O modelo de estabilidade indicou que, na condição de solo saturado para a microbacia sem considerar as adjacências, 9.856 m² (0,32% do total) passariam a ter um Fator de Segurança menor que 1, indicando ruptura iminente do maciço. 180.796 m² (5,87% do total) teriam um FS menor que 1,5 que é o valor mínimo exigido pela NBR 11682 (ABNT, 2006) para que seja garantido um grau de segurança alto para as encostas. Vale salientar que movimentos de massa

afetam toda área ao seu redor, ou seja, caso o fenômeno ocorra na região instável as suas adjacências podem se tornar instáveis também.

A microbacia da nascente Pau Pombo foi a primeira região de Garanhuns a ser ocupada, foi sua área que deu início ao município. Sendo assim, é uma área de alto grau de urbanização e com uma infraestrutura um pouco mais robusta do que a das outras microbacias estudadas. Entretanto, mesmo nessa região existem ocupações em áreas de risco, deficiências no sistema de drenagem pluvial e não existe saneamento básico em todas as ruas.

Somente os resultados da modelagem da estabilidade e da erosão não são o suficiente para criar um retrato real do risco geomorfológico na região. Entre as microbacias estudadas, a nascente Pau Pombo obteve o melhor resultado na modelagem de estabilidade, tendo a menor área considerada como instável (9.856 m²) caso o solo se torne saturado. Entretanto, a partir dos trabalhos em campo, foi possível evidenciar que existem setores da microbacia com características que agravam consideravelmente o risco geomorfológico.

A Figura 35 consiste em uma foto aérea de uma situação de risco geomorfológico na microbacia Pau Pombo.

Figura 35: Ocupação em área de risco na microbacia da nascente Pau Pombo.



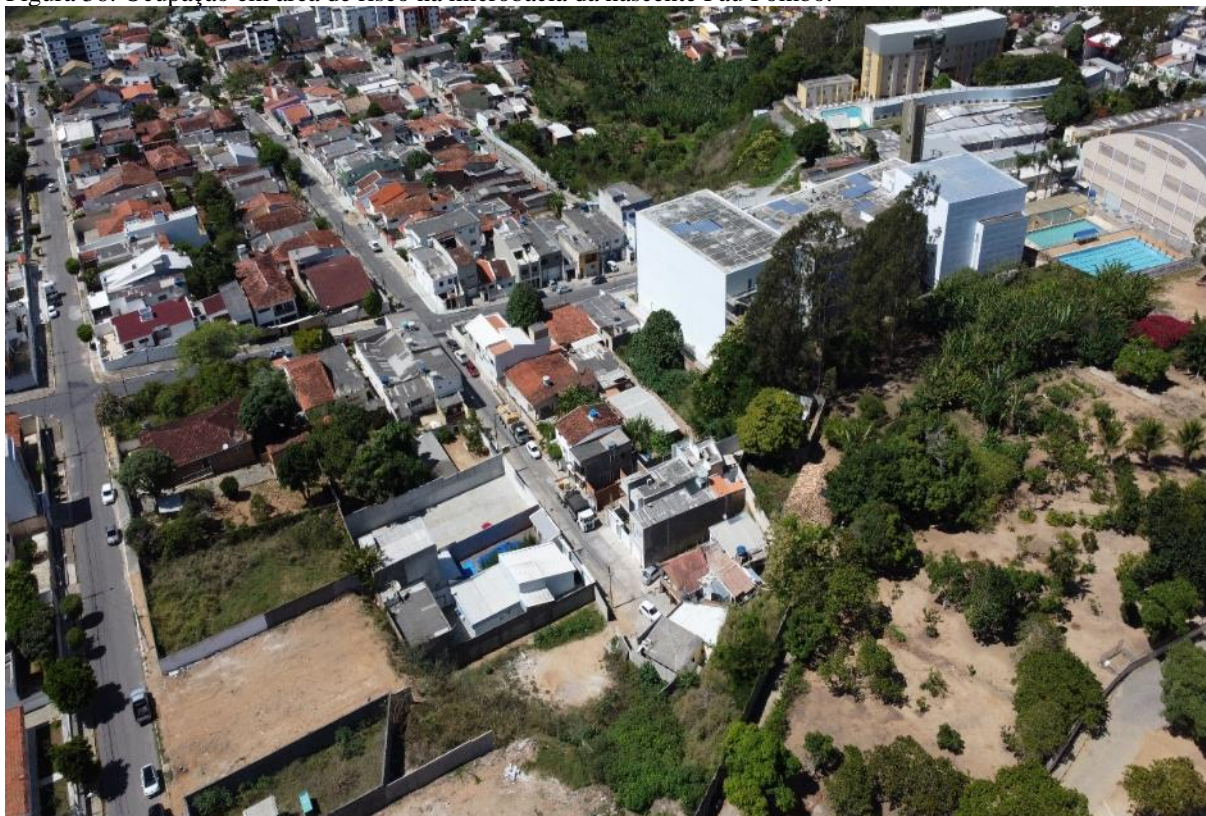
Fonte: Acervo do Autor, 2021.

Observa-se na figura acima uma construção residencial adjacente a um maciço de alta declividade sem que haja algum mecanismo de contenção robusto. O topo do maciço possui o solo completamente exposto, o que agrava os processos erosivos e permite que em períodos de

chuva intensa o solo infiltre no maciço facilmente, saturando o solo, criando assim uma situação de risco para os residentes dessa área. Além disso, é possível observar que não existe um sistema de drenagem para o maciço que evite o acúmulo de escoamento superficial.

A Figura 36 consiste em uma foto aérea em um ângulo diferente do maciço em questão.

Figura 36: Ocupação em área de risco na microbacia da nascente Pau Pombo.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

A rua em frente ao maciço era ocupada por uma voçoroca de alta declividade. Entretanto, ao longo do tempo a área foi ocupada e deu origem a uma rua inteira com diversas residências. Observa-se que a parcela de solo exposto é alta e que em um cenário de movimento de massa, várias residências seriam afetadas. Além disso, a expansão urbana e o agravamento dos processos erosivos pelo solo exposto afetam o fluxo da microbacia e contribuem para a sedimentação da nascente.

A Figura 37 consiste em uma foto aérea de outra região de ocupação ao longo de um maciço de alta declividade na microbacia da nascente Pau Pombo. A figura evidencia outro processo de expansão urbana ao redor de vertentes de alta declividade na microbacia da nascente Pau Pombo. Ao contrário do maciço discutido anteriormente, essa região ainda

apresenta resquícios de cobertura vegetal e partes com vegetação densa. Observam-se focos de solo exposto acompanhados por práticas de agricultura de subsistência.

Figura 37: Ocupação em área de risco na microbacia da nascente Pau Pombo.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

É possível observar a expansão urbana nessa localidade que aos poucos cercou o maciço e deu início a uma nova rua que ainda não foi completamente asfaltada e não possui dispositivos de drenagem. Na localidade é possível encontrar estruturas de contenção simples (Figura 38) mas que não são subsidiadas por sistemas de drenagem do escoamento superficial.

Figura 38: Estrutura de contenção em ocupação na microbacia da nascente Pau Pombo.



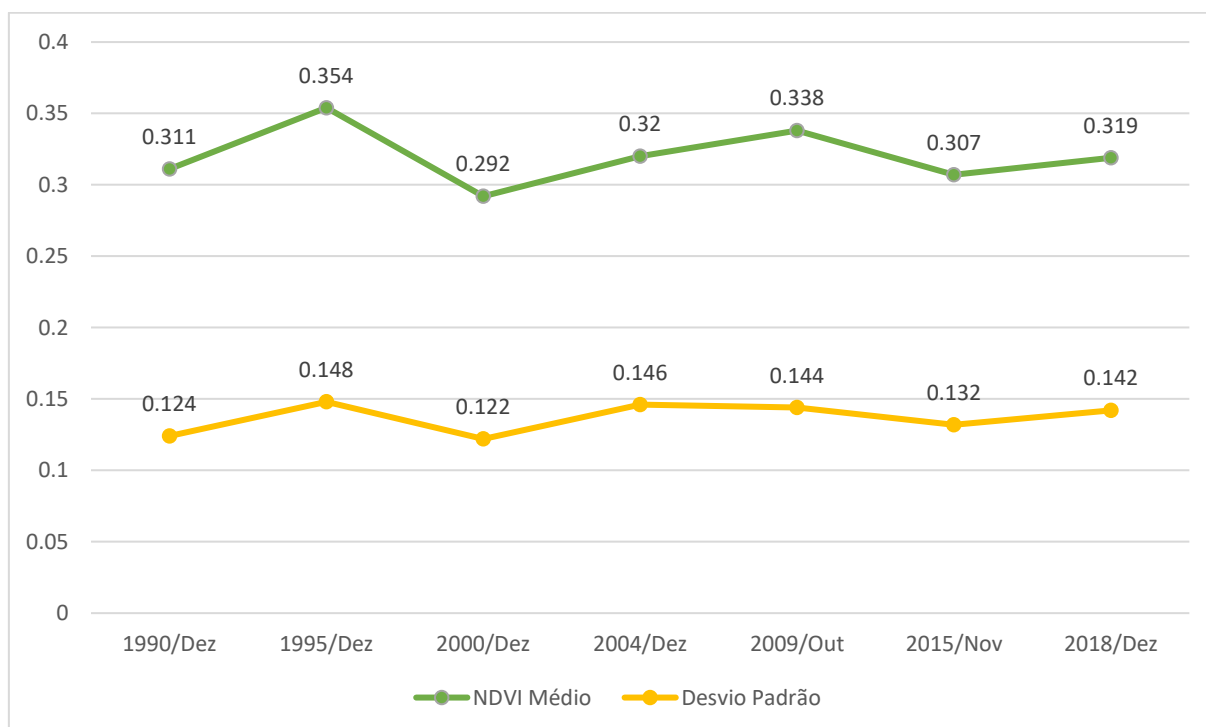
Fonte: Acervo do Autor, 2021.

Por se tratar da primeira região a ser urbanizada no município de Garanhuns, as localidades mais apropriadas para assentamentos já foram ocupadas, restando somente locais impróprios com relevo acidentado. Entretanto, é possível observar que a constante expansão urbana e a especulação imobiliária resultaram na ocupação desses locais impróprios que com o tempo será agravada caso não haja um planejamento urbano adequado. Essa dinâmica de continuação da expansão urbana abre um espaço para a criação de um cenário de risco geomorfológico constante na microbacia.

5.5.1 NDVI da microbacia da nascente Pau Pombo.

A Figura 39 consiste no resultado do cálculo do NDVI para a microbacia da nascente Pau Pombo, contendo valores médios e o desvio padrão.

Figura 39: NDVI da microbacia da nascente Pau Pombo.



Fonte: Adaptado de Landsat 5 e Landsat 8.

Assim como nas outras duas microbacias estudadas, a microbacia da nascente Pau Pombo teve um NDVI médio relativamente constante ao longo dos anos, sem uma tendência clara de aumento ou queda. Entretanto, o desvio padrão não apresentou a mesma tendência de alta como nas outras duas microbacias. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de

que a maior parte da microbacia já passou pela maior parte da fase de expansão da poligonal urbana ao contrário das outras duas microbacias que continuam expandindo.

Outro fator importante na cobertura vegetal da microbacia da nascente Pau Pombo, é o parque Ruber van der Linden que preserva a cobertura vegetal de uma boa parcela da microbacia. Além disso, Chaves e Souza (2018) analisaram os bairros urbanos de Garanhuns onde encontram-se as principais áreas verdes públicas de Garanhuns e concluíram que o bairro Santo Antônio que está localizado na microbacia em questão, possui o maior número de áreas verdes públicas e a maior diversidade arbórea.

Entretanto, ainda é possível visualizar a dispersão da vegetação em certas áreas da microbacia, com diversas áreas impermeáveis ou com apenas resquícios de cobertura vegetal, adjacentes a parcelas de vegetação densa (Figura 40). Porém, como evidenciado pelos resultados do desvio padrão do NDVI, isso não ocorre na mesma magnitude do que nas microbacias do Pau Amarelo e Vila Maria.

Figura 40: Cobertura vegetal na microbacia da nascente Pau Amarelo.



Fonte: Acervo do Autor, 2021.

A preservação da cobertura vegetal em uma parcela considerável da microbacia e o estágio avançado de urbanização combinado às décadas de aterros e compactação constantes na região forneceu a microbacia um certo grau de resistência ao risco geomorfológico.

Entretanto, especialmente quando se considera que conforme Melo (2013) parte das residências do bairro Santo Antônio estão localizadas em uma encosta instável, é essencial que haja um controle da expansão urbana nas áreas remanescentes, especialmente as de alta declividade, e a implementação de um sistema de drenagem pluvial robusto, objetivando prevenir que processos erosivos crie áreas instáveis, mitigando assim o risco geomorfológico.

5.6 Recomendações para mitigação do risco geomorfológico

Considerando o contexto do semiárido brasileiro, é de suma importância que os municípios preservem e recuperem os seus recursos hídricos e desenvolvam um planejamento urbano focado na mitigação de impactos e riscos ambientais como os geomorfológicos.

Em regiões de clima árido ou semiárido, a água é considerada um recurso escasso, cuja demanda aumenta em função do crescimento da população e da economia. Mesmo em face da escassez os recursos hídricos naturais são cada vez mais ameaçados em decorrência da poluição, exploração intensa dos recursos e mudanças climáticas (SOLIMAN, 2010).

De forma geral, ficou evidenciado que os fatores preponderantes na formação dos riscos geomorfológicos, na área urbana de Garanhuns, são oriundos de um planejamento urbano inadequado que ignora os limites da paisagem local provando ocupação de áreas de risco e intensificação dos riscos geomorfológicos inerentes ao relevo da região.

A crescente concentração da população no ambiente urbano, especialmente nos países em desenvolvimento, provoca diversos problemas ambientais associados a exposição das pessoas e dos seus bens devido a ocupação de áreas de risco (MONTEIRO *et al.*, 2016).

A ocupação desordenada é um dos maiores problemas urbanos vivenciados pela sociedade contemporânea. A remoção de mata ciliar agrava a preocupante situação de uso e ocupação do solo em áreas perigosas à habitação humana, acarretando assoreamento, erosão, enchentes e inundações ao local de moradia da população que ocupa esses espaços (SILVA *et al.*, 2016). Portanto, um planejamento urbano que evita a ocupação das áreas de risco e possui mecanismos para controle do descarte de resíduos é essencial para garantir a integridade da população e das microbacias.

5.6.1 Saneamento básico

No cenário nacional, com relação ao nível de atendimento dos serviços de água e esgotamento sanitário, o Brasil tem uma rede de abastecimento de água que, embora não esteja

universalizada, pode ser considerada abrangente, cenário que não se observa na coleta de esgoto, serviço que se encontra em uma situação bastante deficiente tanto no que diz respeito à sua coleta como ao seu tratamento. A deficiência dos serviços de saneamento básico tem profunda correlação com questões de saúde pública e de degradação do meio ambiente (FERREIRA; GARCIA, 2017).

Somente 12% do esgoto urbano em Garanhuns é coletado, criando assim um ambiente onde as áreas de exfiltração das nascentes sofrem contínuo impacto por lançamento de esgotos que são ligados nos canais de águas pluviais que além de contaminar a água gera, em períodos de chuva, uma grande vazão que altera completamente as áreas de exfiltração das nascentes (SOARES; TROLEIS, 2018).

O primeiro passo para a mitigação dos riscos ambientais e recuperação dos recursos hídricos urbanos em Garanhuns, é a ampliação da infraestrutura de saneamento básico na região, especialmente nas comunidades de menor poder aquisitivo.

Os dois problemas de saúde mais graves relacionados à água em áreas urbanas são a contaminação de água potável e a falta de água para lavar, que em áreas urbanas dependem das condições da vizinhança e das condições de moradia. Ambos os problemas são claramente mais severos em condições de pobreza (MCGRANAHAN *et al.*, 2001).

As deficiências no sistema de saneamento básico afetam principalmente a comunidade de menor poder aquisitivo. Esse fato pode ser observado na microbacia da nascente Pau Amarelo, onde a borda leste do Vale da Liberdade é ocupada por uma comunidade de maior risco social. Conforme Melo (2013) o sistema de esgoto das moradias nessa região é estruturado de tal maneira que os dejetos orgânicos são armazenados em fossas individuais ou coletivas nas encostas ou são jogados diretamente nas vertentes.

O uso das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria foi realizado até 1970, quando foi suspenso tendo como uma das razões as suspeitas de contaminação por esgotos advindos das habitações que cada vez mais se aproximavam dos mananciais (SOARES; TROLEIS, 2017). Esse modelo de descarte de resíduos é comum nas ocupações de risco em Garanhuns e além de acarretar a propagação de doenças de veiculação hídrica, contamina o fluxo das nascentes e contribui para a saturação e erosão do solo, intensificando os riscos geomorfológicos.

É importante salientar que as nascentes de Garanhuns contribuem diretamente para o abastecimento do Rio Mundaú e que a recuperação delas trará um novo contingente de fluxo para abastecer tanto Garanhuns quanto aos municípios ao redor. Sendo assim, a ampliação da

infraestrutura de saneamento básico é essencial para a mitigação dos riscos ambientais e para a recuperação das nascentes urbanas.

5.6.2 Microbacia da nascente Vila Maria

A modelagem da microbacia da nascente Vila Maria evidenciou os efeitos constantes da pressão antrópica na região assim como precedentes de riscos e desastres geomorfológicos como a voçoroca encontrada no meio da microbacia. Além disso, foram constatadas alterações na distribuição da cobertura vegetal ao longo do fluxo da nascente.

Considerando a magnitude da voçoroca existente na região e a alta declividade, é essencial que haja um monitoramento e controle dessa área para evitar sua propagação. Para tal, recomenda-se um programa de monitoramento do avanço da voçoroca assim como práticas de revegetação da área para mitigação dos processos erosivos.

Entre as microbacias estudadas, a da nascente Vila Maria apresentou a maior declividade média assim como a maior parcela de relevo ondulado. Considerando que conforme Mendes (2006) áreas com maior declividade são mais afetadas pela erosão, há então uma predisposição da microbacia a esse risco geomorfológico. Portanto, é necessário um controle e monitoramento rigoroso das áreas de maior declividade da região, objetivando mitigar os efeitos da erosão do solo, a susceptibilidade à movimentos de massa e a sedimentação.

Garantir um sistema de drenagem adequado do escoamento superficial evitará a criação de novas voçorocas na microbacia da nascente Vila Maria e diminuirá a probabilidade de saturação do solo. Além disso, é necessário promover a revegetação das áreas com solo exposto, especialmente as que estão no topo da microbacia e que são afetadas constantemente pela expansão urbana contínua. Essas localidades são vulneráveis à erosão do solo, provocando sedimentação da nascente e a saturação do solo que por sua vez acarreta movimentos de massa.

Nesse aspecto, a bioengenharia surge como um grande subsídio para a estabilização do relevo da microbacia. Recomenda-se a sua aplicação a partir da revegetação da cobertura do solo, especialmente em conjunto com biomantas que são materiais biodegradáveis de baixo com degradação programável que reduzem o impacto do escoamento superficial e propiciam o fornecimento de nutrientes para as plantas (COUTO *et al.*, *apud* BEZERRA, 2011). A aplicação dessas biomantas protegerão o solo exposto durante o processo de revegetação e serão eventualmente consumidas pela vegetação.

Os resultados dos modelos podem ser utilizados para identificar locais pontuais onde as intervenções de revegetação e drenagem são mais necessárias, possibilitando a identificação de ruas e construções que estão mais expostas aos riscos geomorfológicos.

A princípio o fluxo da nascente Vila Maria é aproveitada para criação de gado e para lavar roupas na lavanderia pública municipal (MELO, 2013). Isso evidencia que parte do fluxo da nascente já é aproveitado para abastecimento da população, porém uma parcela considerável continua sendo desperdiçada pelo município e acaba sendo contaminada no final do curso em virtude dos descartes inadequados de resíduos e esgoto pluvial. Sendo assim, a ampliação do saneamento básico e da drenagem urbana previamente discutida evitaria essa contaminação da nascente e garantiria que a sua vazão não será afetada por sedimentos.

5.6.3 Microbacia da nascente Pau Amarelo

Os resultados da modelagem e do trabalho em campo evidenciaram o cenário de risco ambiental na microbacia, especialmente quando se considera o histórico de movimentos de massa do Vale da Liberdade.

A microbacia da nascente Pau Amarelo apresentou os piores resultados durante a modelagem da estabilidade, possuindo, entre as microbacias estudadas, a maior parcela (108.297 m²) de solo instável na condição de solo saturado. Além disso, a microbacia também apresentou a maior proporção de relevo Forte Ondulado. Esses resultados são impulsionados pela situação crítica do Vale da Liberdade que é responsável por acomodar quase todo o risco geomorfológico da região.

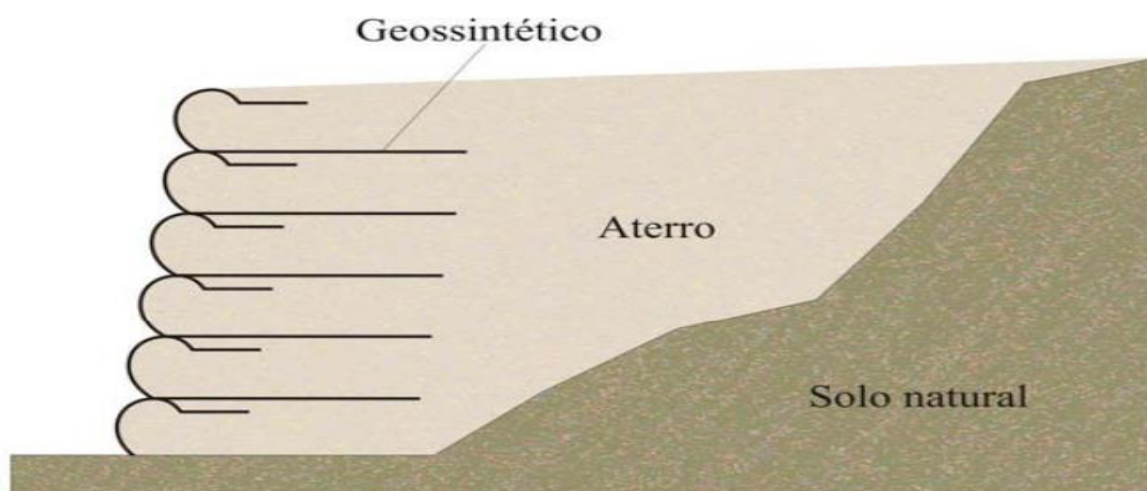
A borda leste do vale, popularmente chamado de Buracão, é ocupada pela comunidade da Liberdade. As encostas dessa área estão desestabilizadas devido à retirada de cobertura vegetal nativa para ampliação do perímetro urbano sem a devida infraestrutura. O modelo de uso e ocupação do espaço geográfico ocorre de forma mais estruturada na borda oeste, pois a população que ocupa essa localidade é de alto poder aquisitivo (MELO, 2013). Nesse sentido, o Vale da Liberdade se constitui em marco espacial que separa formas espaciais qualitativamente distintas com conteúdo sociais também distintos, implicando em potencialidades de impactos ambientais diferentes assim como em fragilidades diferenciadas nas vertentes oeste e leste (SOARES; TROLEIS, 2017).

Sendo assim, a exposição da população aos riscos geomorfológicos é bem mais acentuada na região leste da microbacia. Além disso, a comunidade que ocupa a região leste, por motivos socioeconômicos, está mais vulnerável aos riscos ambientais. Portanto, a maior

parte das intervenções que objetivam a mitigação dos riscos geomorfológicos deve ser realizada na região oeste da microbacia da nascente Pau Amarelo.

Em virtude do alto grau de instabilidade das encostas do Vale da Liberdade, recomenda-se a instalação de estruturas de contenção que prevenirão a ocorrência de movimentos de massa e seus impactos. Para tal, recomenda-se a utilização de solo reforçado com geossintéticos (Figura 41).

Figura 41: Seção transversal de um talude reforçado com geossintético.



Fonte: Santos, 2007.

O solo reforçado é uma técnica que tem como objetivo aumentar a resistência do solo à esforços de tração a partir da inserção de materiais como geossintéticos, que proporcionam uma redistribuição global das tensões e deformações. As mantas geotêxteis são responsáveis em resistir aos esforços atuantes do talude, garantindo a sua estabilidade. Esse método resulta em uma estrutura final flexível e economicamente viável (CONCEIÇÃO, 2011).

A inclusão de materiais como raízes de árvores, telas de bambu e fibras de coco vem sendo realizada desde a antiguidade com o intuito de aumentar a resistência do solo. O desenvolvimento de materiais poliméricos nas últimas décadas deu início a criação de materiais geossintéticos que atualmente são amplamente usados para garantir a estabilidade do solo (SANTOS, 2007).

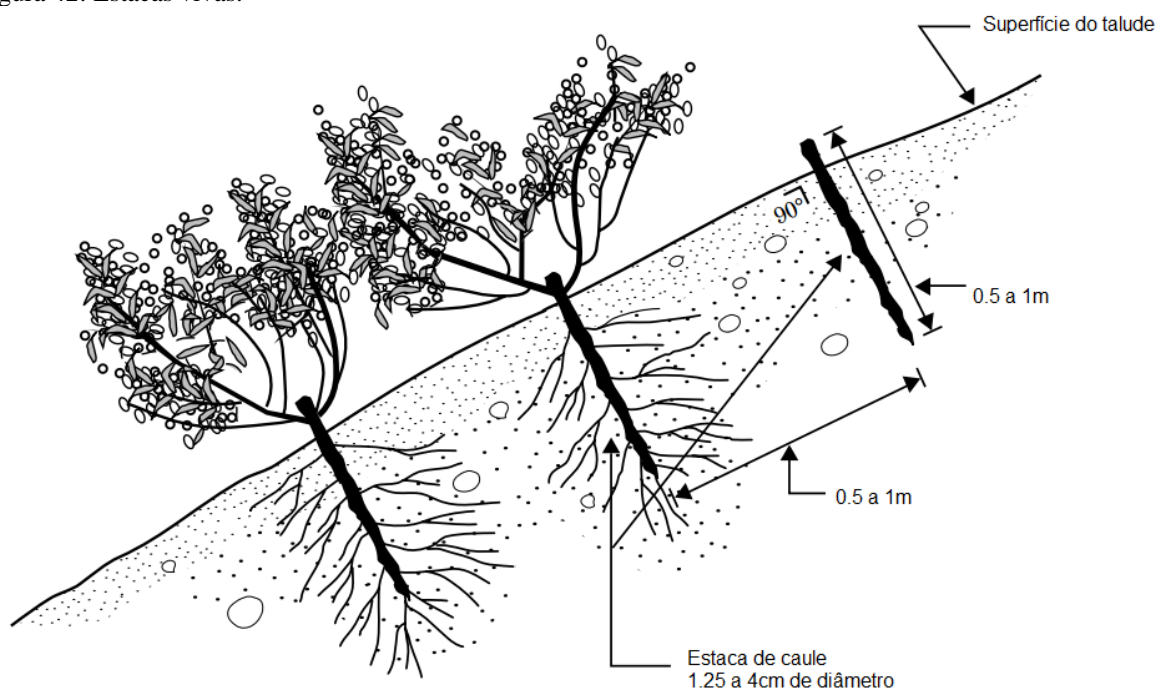
Conforme o Departamento de Estradas de Rodagem – DER (1987, *apud* BENJAMIM, 2006) a utilização de solo reforçado chega a custar 30 a 50% menos do que soluções convencionais, principalmente quando a contenção tem 6 metros de altura. Essa economia se deve ao fato de que para execução do solo reforçado não se é necessária mão de obra especializada ou equipamentos caros (BENJAMIM, 2006).

A aplicação desse tipo de tecnologia ambiental garantirá a mitigação dos riscos geomorfológicos relacionados a erosão e movimentos de massa nas encostas do Vale da Liberdade. Os resultados da modelagem de estabilidade podem ser utilizados para identificar os locais onde essa intervenção é necessária.

Assim como recomendado para a microbacia da nascente Vila Maria, recomenda-se a aplicação de práticas de revegetação nas áreas onde o solo esteja exposto. Essas práticas podem ser subsidiadas pela aplicação de biomantas para proteção do solo e para garantir nutrientes enquanto a cobertura vegetal cresce. Entretanto, considerando o alto grau de risco geomorfológico na microbacia da nascente Vila Maria, é importante que a revegetação seja realizada por uma espécie que garantirá resistência as vertentes. Sendo assim, recomenda-se a aplicação da técnica de bioengenharia que envolve a utilização de estacas vivas.

O método de estacas vivas (Figura 42) é uma das técnicas mais utilizadas da bioengenharia que representa bem a metodologia geral de suas aplicações. Este método é constituído da inserção de estacas vivas no perfil do solo que procuram fornecer estabilidade ao solo a partir do reforço e ligação de suas partículas e pela remoção de umidade excessiva (USDA, 1992).

Figura 42: Estacas vivas.



Fonte: Adaptado de USDA, 1992.

Esse método pode ser aplicado a partir da revegetação com espécies como capim vetiver que além de promover a estabilidade do maciço, trará grandes benefícios ao paisagismo do Vale da Liberdade.

O capim vetiver é uma planta herbácea que se adapta facilmente às diversas condições ambientais, se desenvolvendo tanto em solos arenosos como argilo-arenosos com raízes que normalmente alcançam 3 metros de profundidade (PEREIRA, 2006 *apud* QUITO, 2014).

Ademais, recomenda-se que os órgãos públicos implementem mecanismos que evitem o acúmulo de resíduos sólidos ao longo da microbacia, especialmente nas regiões de maior risco social. Outro problema que precisa ser imediatamente solucionado é a trincheira que se encontra na encosta leste do Vale da Liberdade (Figura 10A, p. 36), pois ela contribui para a infiltração e consequente saturação do solo da encosta. Além disso, é necessária uma revisão da dinâmica de drenagem superficial na região. É imprescindível a implementação de um sistema que evite a criação de picos de escoamento superficial na vertente.

Controlar a instabilidade das encostas na microbacia terá grandes efeitos na vazão da nascente Pau Amarelo pois irá promover a diminuição de sedimentos. As intervenções recomendadas também trariam grandes benefícios a qualidade de vida dos moradores e ao paisagismo da região, este último é de extrema importância para o desenvolvimento econômico da cidade, tendo em vista que Garanhuns tem um setor de turismo bastante aquecido.

5.6.4 Microbacia da nascente Pau Pombo

Entre as microbacias estudadas, a da nascente Pau Pombo apresentou a maior resistência aos riscos geomorfológicos. A região apresentou a menor declividade média (6,8 °), a menor quantidade de área com relevo Forte Ondulado (5544 m²) e os resultados da modelagem da estabilidade para a condição de solo saturado indicaram que a microbacia teve a menor quantidade de área que se tornaria instável (9.856 m²). Além disso, ao contrário das outras microbacias e da análise de Garanhuns como um todo, o NDVI da região não apresentou o mesmo fenômeno de dispersão crescente.

O fato da região da microbacia da nascente Pau Pombo ter sido o primeiro bairro a ser ocupado no município indica que ela está em uma fase de urbanização mais avançada que as demais. Além disso, ela apresenta uma infraestrutura mais robusta com mais dispositivos em drenagem do escoamento superficial. Essas condições somadas a geomorfologia da área e a preservação da vegetação no parque Ruber van der Linden, configura um cenário onde o risco

geomorfológico da microbacia da nascente Pau Pombo é menor do que as das nascentes Pau Amarelo e Vila Maria.

Entretanto, a região, embora em uma proporção menor, passa pelos mesmos problemas que as demais, com ocupações em encostas instáveis, parcelas consideráveis de solo exposto e descarte inadequado de resíduos que contaminam o fluxo da microbacia.

Sendo assim, é necessário a aplicação de intervenções pontuais para evitar a intensificação dos riscos ambientais. Um dos fatores preocupantes da microbacia que foi abordado durante a fase de análise no capítulo 5.5 é o avanço da expansão urbana em locais impróprios. Como praticamente a maior parte da sua área propícia à ocupação humana já foi assentada, a expansão agora ocorre em direção a vertentes com alta predisposição à riscos geomorfológicos. Portanto, é necessário a aplicação de um planejamento urbano que evite a expansão em direção à essas áreas, objetivando a manutenção da cobertura vegetal e a segurança das moradias adjacentes.

Entre as localidades analisadas na microbacia, o maciço de solo exposto (Figura 35, p. 63) apresentou o maior risco geomorfológico, sendo imprescindível uma intervenção na localidade que objetive promover uma cobertura vegetal no maciço para evitar a erosão e saturação do solo e consequentes movimentos de massa. Para tal, assim como foi recomendado nas outras duas microbacias, a aplicação de biomantas a revegetação pelo método de estacas vivas irá promover a estabilidade do maciço e a proteção contra erosão e saturação do solo. O mesmo método pode ser aplicado em outras regiões da microbacia com contextos similares.

A aplicação dessas recomendações garantirá um alívio da pressão antrópica no ecossistema local, evitando que a microbacia da nascente Pau Pombo se torne vulnerável aos riscos geomorfológicos. Enquanto a ampliação do sistema de saneamento básico em conjunto com o sistema de drenagem superficial evitará a contaminação da nascente, prevenindo a propagação de doenças de veiculação hídrica.

6. CONCLUSÃO

Os resultados da modelagem e do trabalho em campo, evidenciaram um cenário de risco geomorfológico tanto na área urbana de Garanhuns como um todo, quanto nas microbacias das nascentes Pau Amarelo, Pau Pombo e Vila Maria. Foi possível constatar o efeito das ações antrópicas na região oriundas de uma expansão urbana sem planejamento urbano e saneamento básico. Esse crescimento criou desequilíbrios na paisagem natural, especialmente nas microbacias estudadas que sofrem constantemente com a pressão antrópica.

A modelagem da estabilidade da área urbana de Garanhuns indicou que 2,45 % da área urbana se torna instável na condição de solo saturado. Em um cenário de movimento de massa, as áreas adjacentes também se tornam instáveis e considerando a densidade populacional da área urbana a concretização desse risco geomorfológico pode ser catastrófica. Além disso, a modelagem do NDVI revelou distúrbios na dispersão da cobertura vegetal que foram confirmados pelo trabalho em campo, o que evidencia a pressão antrópica na geomorfologia. O comportamento do NDVI pode servir como um indicador de que o modelo de desenvolvimento da malha urbana pode estar desconsiderando os limites da paisagem.

Entre as microbacias estudadas, a da nascente Pau Pombo apresentou a maior resistência aos riscos geomorfológicos, porém ela ainda sofre com os mesmos problemas das outras nascentes como ocupações em áreas instáveis, erosão, sedimentação e contaminação das nascentes. Considerando o contexto do semiárido, a recuperação dessas áreas, assim como a mitigação dos riscos geomorfológicos, são ações imprescindíveis. Nesse contexto, as tecnologias e geotecnologias surgem como um grande subsídio ao fornecerem ferramentas e mecanismos para modelagem, análise, monitoramento e controle dos riscos ambientais especialmente os geomorfológicos.

Os modelos de estabilidade e erosão elaborados nessa pesquisa foram essenciais para a elaboração das recomendações que objetivam a mitigação dos riscos geomorfológicos e a revitalização do fluxo das microbacias. Vale salientar, que em virtude das características inerentes as geotecnologias, os modelos elaborados podem ser facilmente customizados e aplicados em outras áreas, e podem também, ser aplicados com dados de maior resolução.

Por fim, conclui-se que analisar as inter-relações entre a expansão urbana, topografia, vegetação e o risco geomorfológico, a partir de tecnologias ambientais e geotecnologias pode ser um grande subsídio para garantir um planejamento urbano eficaz que considera as limitações da paisagem e impõe medidas voltadas à preservação do ecossistema natural.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. D. M; ROCHA, A. C. P; SILVA, O. G. Riscos geomorfológicos e sensibilidade da paisagem na bacia hidrográfica do Rio Paratibe (BHRP) – região metropolitana do Recife. **Revista Cerrados**, Montes carlos, v. 16, n. 1, p. 103-129, 2018. DOI: <https://doi.org/10.22238/rc2448269220181601103129> Disponível em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/cerrados/article/view/1280> Acesso em: 4 abr. 2021.

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, [S.l.], v. 47, n. 2-4, p. 107-124, 2002. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00083-1](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00083-1) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X02000831> Acesso em: 3 abr. 2021.

ALCÁNTARA-AYALA, I. **Geomorphology and disaster prevention**. In: ALCÁNTARA-AYALA, I; GOUDIE, A. S. (org.). *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527.022>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 11682/2006. **Estabilidade de encostas**. ABNT: Rio de Janeiro, 2006.

ASSUNÇÃO, D. M. S. **Padrão quali-quantitativo do descarte de águas residuárias em áreas carentes**: um estudo no alto do Bom Viver em Salvador. 170f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Escola Politécnica – Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2005.

AZAMBUJA, R. N; CORRÊA, A. C. B. Geomorfologia e áreas de expansão urbana do município de Garanhuns-PE: uma abordagem espaço-temporal dos eventos morfodinâmicos para o planejamento territorial. **GEO UERJ**, Rio de Janeiro, n. 27, p. 202-233, 2015. DOI: <https://doi.org/10.12957/geouerj.2015.16739> Disponível em: <https://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/geouerj/article/view/16739> Acesso em: 23 mai. 2019.

BARBOSA, V. V; SOUZA, W. M; GALVÍNIO, J. D; COSTA, V. S. O. Análise da variabilidade climática do município de Garanhuns, Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 09, n. 02, p. 353-367, 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233698/27275> Acesso em: 15 out. 2021.

BENJAMIM, C. V. S. **Avaliação experimental de protótipos de estruturas de contenção em solo reforçado com geotêxtil**. 294 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escolha de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.

BEZERRA, J. F. R. **Geomorfologia e reabilitação de áreas degradadas por erosão com técnicas de bioengenharia de solos na bacia do Rio Bacanga, São Luís – MA**. 249 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

BIELLA, C. A; COSTA, R. A. **Análise da qualidade ambiental das nascentes urbanas de Caldas Novas – GO.** In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6, 2006, Goiânia. Disponível em: <<http://www.labogef.iesa.ufg.br/links/sinageo/articles/148.pdf>> Acesso em: 05 jan. 2017.

BRASIL. **Lei n. 12.651, de 25 de maio de 2012.** Estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal; a exploração florestal, o suprimento de matéria-prima florestal, o controle da origem dos produtos florestais e o controle e prevenção dos incêndios florestais, e prevê instrumentos econômicos e financeiros para o alcance de seus objetivos. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12651.htm> Acesso em: 16 abr. 2019.

BRITO, F. C. S. *et al.* Uma abordagem histórica e teórica das políticas públicas de combate à seca e convivência com o semiárido. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, Pombal, v. 11, n. 01, p. 57-65, 2017. Disponível em: <<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RBGA/article/view/4749>> Acesso em: 25 nov. 2019.

BUDHU, M. **Soil mechanics and foundations.** 3. ed. New York: Wiley, 2010.

CALHEIROS, R. O. *et al.* **Preservação e recuperação das nascentes de água e vida.** 2 ed. São Paulo: Secretaria do Estado de Meio Ambiente – Departamento de Proteção da Biodiversidade, 2009. Disponível em: <<http://www.ambiente.sp.gov.br/>> Acesso em: 5 jan. 2017.

CARMO, L. G; FELIPPE, M. F; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Áreas de preservação permanente no entorno de nascentes: conflitos, lacunas e alternativas da legislação ambiental brasileira. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 34, n. 2, p. 275-293, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5216/bgg.v34i2.31733> Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/31733>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

CASCALES, M. I; LLORENS, J. L. S; GINER, J. J. Cálculo de Escenarios de Daños Sísmicos en la Comunidad Valenciana utilizando Model Builder (ArcGIS). **Geogaceta**, Salamanca, v. 62, p. 67-70, 2017. Disponível em: <https://sge.usal.es/publicaciones/geogaceta/2017_62.html> Acesso em: 16 abr. 2019.

CHAVES, A. M. S; SOUZA, R. M. Dinâmica fitogeográfica de áreas verdes públicas da cidade de Garanhuns, Pernambuco. **Caderno de Geografia**. Belo Horizonte, v. 28, n. 54, p. 531-551, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2018v28n54p531-551> Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/16934> Acesso em: 03 abr. 2021.

CONCEIÇÃO, D. A. **Análise paramétrica da estabilidade de um talude grampeado.** 79 f. Projeto de graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

CONDUTO, D. P. **Foundation Design: Principles and Practices.** 2 ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2001.

CORDEIRO, A. P. A. *et al.* Regiões homogêneas de vegetação utilizando a variabilidade do NDVI. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.27, n. 3, p. 883-896, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509828638> Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/185150>> Acesso em: 15 mai. 2019.

CUNHA, L; RAMOS, A. M. **Riscos naturais em Portugal: alguns problemas e perspectivas e tendências no estudo dos riscos geomorfológicos.** In: LOMBARDO, M. A; FREITAS, M. I. C. (org.). Riscos e vulnerabilidade: teoria e prática no contexto luso-brasileiro. São Paulo: Cultura acadêmica, 2013. DOI: <https://doi.org/10.13140/rg.2.1.1590.1524>

DEUS, R. A. S. G; RAMOS, R. P. S; COSTA, S. O. S; GOMES, D. D. M. Análise multitemporal da expansão urbana do município de Garanhuns - PE, através do sensoriamento remoto. **Reget**, Santa Maria, v. 19, n. 2, p. 1535-1544, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5902/2236117015541> Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/15541> Acesso em: 4 abr. 2021.

DOU, J; PAUDEL, U; OGUCHI, T; UCHIYAMA, S; HAYAKAWA, Y. S. Shallow and deep-seated landslide differentiation using support vector machines: a case study of the Chuetsu Area, Japan. **Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences**, Taiwan, v. 26, n. 2, p. 227-239, 2015. DOI: [https://doi.org/10.3319/tao.2014.12.02.07\(eosi\)](https://doi.org/10.3319/tao.2014.12.02.07(eosi)) Disponível em: <http://tao.cgu.org.tw/index.php/articles/archive/geology/item/1307-2014120207eosi>> Acesso em: 11 abr. 2019.

DURIGON, V. L. *et al.* NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. **International Journal of Remote Sensing**, [S.l.], v. 35, n. 2, p. 441-453, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1080/01431161.2013.871081> Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2013.871081>> Acesso em: 1 maio 2019.

DRAGICEVIC, S; LAI, T; BALRAM, S. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. **Habitat International**, [S.l.], v. 45, n.2, p. 114-125, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.031> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0197397514001076>> Acesso em: 14 maio 2019.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php> Acesso em: 15 out. 2016.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. Brasília: EMBRAPA, 2013.

ESPINDOLA, G. M; CARNEIRO, E. L. N. C; FAÇANHA, A. C. Four decades of urban sprawl and population growth in Teresina, Brazil. **Applied Geography**, [S.l.], v. 79, p. 73-83, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.018>

FELIPPE, M. F. **Caracterização e tipologia de nascentes em unidades de conservação de Belo Horizonte-MG com base em variáveis geomorfológicas, hidrológicas e ambientais.** Dissertação (Mestrado em Geografia e Análise Ambiental) – Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais. 275f. Belo Horizonte, 2009.

FELIPPE, M. F; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. **GeoGrafias**, Belo Horizonte, v. 9, n. 1, p. 70-81, 2013. Disponível em: <<http://www.igc.ufmg.br/portaldeperiodicos/index.php/geografias/article/view/583/geografias/index>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

FELIPPE, M. F; MAGALHÃES JUNIOR, A. P. Impactos ambientais macroscópicos e qualidade das águas em nascentes de parques municipais em Belo Horizonte - MG. **GeoGrafias**, Belo Horizonte, p. 8-23, 2012. Disponível em: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/geografias/article/view/13336>>. Acesso em: 05 jan. 2017.

FERNANDES, N. F. *et al.* Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v. 2, n. 1, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v2i1.8> Disponível em: <<http://www.ugb.org.br/>> Acesso em: 10 nov. 2016.

FERREIRA, M. P; GARCIA, M. S. D. Saneamento básico: meio ambiente e dignidade humana. **Dignidade Re-Vista**, [S.l.], v. 2, n. 3, 2017. Disponível em: <http://periodicos.puc-rio.br/index.php/dignidaderevista/article/view/393> Acesso em: 4 abr. 2021.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS – FAO. **World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps.** Roma: FAO, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/publications/card/en/c/942e424c-85a9-411d-a739-22d5f8b6cc41/>> Acesso em: 01 dez. 2019.

FOOTE, K. E; LYNCH, M. **Geographic Information Systems as an Integrating Technology:** context, concept and definitions. The Geographer's Craft Project, 1995. Disponível em: <<http://www.colorado.edu/geography/>> Acesso em: 15 out. 2015.

GANASRI, B. P; RAMESH, H. Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS - A case study of Nethravathi Basin. **Geoscience Frontiers**, Beijing, v. 7, n. 6, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007> Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987115001255>> Acesso em: 9 maio 2019.

GARCÍA-SORIANO, D; QUESADA-ROMÁN, A; ZAMORANO-OROZCO, J. J. Geomorphological hazards susceptibility in high-density urban areas: A case study of Mexico City. **Journal of South American Earth Sciences**, [S.l.], v. 102, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102667> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895981120302108> Acesso em: 3 abr. 2021.

GEERTSEMA, M; HIGHLAND, L; VAUGEOUIS, L. **Environmental Impact of Landslides**. In: SASSA, K; CANUTI, P. (org.). *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Berlin: Springer, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_31 Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-540-69970-5_31 Acesso em: 4 abr. 2021.

GERSCOVICH, D. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GOUDIE, A. S. **Introduction**. In: ALCÁNTARA-AYALA, I; GOUDIE, A. S. (org.). *Geomorphological hazards and disaster prevention*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807527.001>

GUERRA, A. J. T; MARÇAL, M. S. **Geomorfologia Ambiental**. 3. ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 2010.

JORGE, M. C. O; GUERRA, A. J. T. **Erosão dos solos e movimentos de massa – recuperação de áreas degradadas com técnicas de bioengenharia e prevenção de acidentes**. In: GUERRA, A. J; JORGE, M. C. O. (org.). *Processos erosivos e recuperação de áreas degradadas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

HALOUNOVÁ, L. GIS as a tool for landslide analyses. In: RYBAR, J; STEMBERK, J; WAGNER, P. **Landslides: Proceedings of the First European Conference on Landslides**, Prague, Czech Republic, 24-26 June 2002. [S.l.], CRC Press, 2002.

HAUGEN, B. D. A design method for landslide surface water drainage control. **Environmental & Engineering Geoscience**, Washington, v. 23, n. 4, p. 275-289, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.23.4.275> Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/aeg/eeg/article-abstract/23/4/275/521222/a-design-method-for-landslide-surface-water?redirectedFrom=fulltext> Acesso em: 10 abr. 2019.

HUANG, F. *et al.* Landslide susceptibility prediction considering regional soil erosion based on machine-learning models. **International Journal of Geo-Information**, [S.l.], v. 9, n. 6, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9060377> Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/9/6/377> Acesso em: 04 abr. 2021.

HUDSON, N. **Field measurement of soils erosion and runoff**. Bedford: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1993.

HUFFNER, J. G. P; OLIVEIRA, A. R. F. Crescimento urbano desordenado no município de Ponta de Pedras na Ilha do Marajó: um estudo de caso do bairro do Carnapijó. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**. Grajaú, v. 3, n. 8, p. 159-181, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.18764/2446-6549.v3n8p159-181> Disponível em: <http://www.periodicoseletronicos.ufma.br/index.php/interespaço/article/view/6440> > Acesso em: 10 abr 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Malhas Digitais**. Disponível em: http://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm Acesso em: 10 jan. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA - INMET. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 21 dez. 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **Projeto Topodata**. Disponível em: <www.dsr.inpe.br/topodata>. Acesso em: 02 mar. 2016.

ISHIBASHI, I; HAZARIKA, H. **Soil mechanics fundamentals**. 2. Ed. Boca Raton: CRC PRESS, 2015.

JULIEN, P. Y. **Erosion and sedimentation**. Cambridge: University of Cambridge, 1998.

KASPERSEN, P. S. *et al.* Influence of urban land cover changes and climate change for the exposure of European cities to flooding during high-intensity precipitation. **PIAHS**, Göttingen, v. 370, p. 21-27, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/piahs-370-21-2015> Disponível em: <<https://www.proc-iahs.net/370/21/2015/>> Acesso em: 16 mai. 2019.

KIM, K; PARK, H; LEE, S; WOO, I. Geographical information systems (GIS) based stability analysis of rock cut slopes. **Geosciences Journals**, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 391-400, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02910475> Disponível em: <http://link.springer.com/journal/12303>. Acesso em: 03 nov. 2015.

LEAL, M. S; TONELLO, K. C; DIAS, H. C. T; MINGOTI, R. Caracterização hidroambiental de nascentes. **Ambiente e Água**, [S.l.], v. 12, n. 1, p. 146-155, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1909> Disponível em: <http://www.ambi-agua.net/seer/index.php/ambi-agua/article/view/1913> Acesso em: 12 jul. 2021.

LI, D; WU, S; LIANG, Z; LI, S. The impacts of urbanization and climate change on urban vegetation dynamics in China. **Urban Forestry & Urban Greening**, [S.l.], v. 54, n. 126764, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126764> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1618866720305811> Acesso em: 04 abr. 2021.

LOZINSKI, M. A. *et al.* Diagnóstico das áreas de preservação permanente de nascentes na área urbana do município de Irati-PR. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 1, p. 63-70, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/ufpr.v40i1.17099> Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/17099>>. Acesso em: 16 abr. 2019.

MAGALHÃES, J. S. L. A. **Estudo de estabilidade da encosta Alto do Padre Cícero no município de Camaragibe – PE**. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

MCGRANAHAN, G. *et al.* **The citizens at risk: from urban sanitation to sustainable cities**. Londres: Earthscan Publications Ltd, 2001.

MEIRA, M. M. C. *et al.* A beleza seca: aspectos do paisagismo no semiárido brasileiro. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 3, n. 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2017.v3.n2.108-113> Disponível em: <<http://nexos.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/1938/1377>> Acesso em: 25 nov. 2019.

MELO, F. P; ALMEIDA, J. P. Crescimento urbano desordenado e seus reflexos nas encostas dos vales de Garanhuns-PE. **ANAP Brasil**, [S.l.], v. 6, n. 7, p. 40-65, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.17271/19843240672013422> Disponível em: https://amigosdanatureza.org.br/publicacoes/index.php/anap_brasil/article/view/422 Acesso em: 01 fev. 2021.

MELO, F. P. Modelo de uso e ocupação da paisagem no município de Garanhuns – PE. **Reget**, Santa Maria, v.10, n. 10, p. 2198-2207, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5902/223611707857> Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/7857> Acesso em: 08 nov. 2016.

MELO, F. P. **Risco Ambiental e Ordenamento do Território em Garanhuns-PE**. 247f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2016.

MELO, F. P; SOUZA, R. M. Energia eletromagnética na superfície terrestre: estimativa multitemporal do albedo em Garanhuns-PE. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 170-178, 2016. DOI: 10.5902/2179-460X18754 Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/18754> Acesso em: 25 nov. 2019.

MELO, F. P; SOUZA, R. M. Mapeamento geomorfológico da fragilidade ambiental do sítio urbano de Garanhuns - PE. **Nativa**, Sinop, v. 3, n. 4, p. 263-267, 2015. DOI: 10.31413/nativa.v3i4.2191 Disponível em: <<http://www.periodicoscientificos.ufmt.br/>> Acesso em: 08 nov. 2016.

MENDES, C. A. R. **Erosão superficial em encosta íngreme sob cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ**. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

MENDES, R. M. *et al.* Stability analysis on urban slopes: case study of an anthropogenic-induced landslide in São José dos Campos, Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, [S.l.], v. 36, n.1, p.599-610, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0303-z> Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10706-017-0303-z>> Acesso em: 14 maio 2019.

MERGILI, M; MARCHESINI, I; ALVIOLI, M; METZ, M; SCHNEIDER-MUNTAU, B; ROSSI, M; GUZZETTI, F. A strategy for gis-based 3-D slope stability modelling over large areas. **Geoscientific Model Development**, [S.l.], v. 7, n. 6, p. 2969-2982, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2969-2014> Disponível em: < <http://www.geosci-model-dev.net/>>. Acesso em: 10 set 2015.

MESQUITA, P. S; BURSZTYN, M. Alimentação e mudanças climáticas: percepções e o potencial de mudanças comportamentais em prol da mitigação. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, [S.l.], v. 49, p. 1-16, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v49i0.54835> Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/made/article/view/54835/37455>>. Acesso em: 16 maio 2019.

MIGUEZ, M. G; VERÓL, A. P; RÊGO, A. Q. S. F; LOURENÇO, I. B. Urban Agglomeration and Supporting Capacity: The Role of Open Spaces within Urban Drainage Systems as a Structuring Condition for Urban Growth. *In*: ERGEN, M. (Org.). **Urban Agglomeration**, [S.l.]: IntechOpen, 2017. p. 3-28. DOI: 10.5772/intechopen.71658

MOHAPATRA, S. N; PANI, P; SHARMA, M. Rapid urban expansion and its implications on geomorphology: a remote sensing and GIS based study. **Geography Journal**, [S.l.], v. 2014, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/361459> Disponível em: <https://www.hindawi.com/journals/geography/2014/361459/> Acesso em: 3 abr. 2021.

MONTEIRO, S; FREIRE, G. S. S. Cunha, L. Percepção dos riscos de cheias e inundações na cidade da praia (Cabo Verde). **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**, Fortaleza, v. 11, n. 1, p. 117-129, 2016. DOI: <https://doi.org/10.22411/rede.v11i1.364> Disponível em: <http://www.revistarede.ufc.br/rede/article/view/364> Acesso em: 10 abr. 2019.

MORAIS, R. C. S; SALES, M. C. L. Estimativa do potencial natural de erosão dos solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de sistema de informação geográfica. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v.27, n. 1, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27nesp1p84> Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/p.2318-2962.2017v27nesp1p84> Acesso em: 25 nov. 2019.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion & conservation**. 3. ed. Oxford: Blackwell Publishing, 2005.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **ASTER GDEM v2**. Disponível em: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> Acesso em: 12 out. 2016.

NEGRI-SAKATA, V; KIMURA, I. Y. Nascentes Urbanas de Goioerê: diagnóstico ambiental. **Geografia (Londrina)**, Londrina, v. 27, n. 2, p. 185-205, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5433/2447-1747.2018v27n2p185> Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/32501> Acesso em: 12 jul. 2021.

NOURI, H. *et al.* NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands. **Science of The Total Environment**, [S.l.], v. 584-585, p. 11-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.130> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969717301407?via%3Dihub> Acesso em: 15 mai. 2019.

OLIVEIRA; A. A; BORGES, J. T. Análise da vulnerabilidade populacional aos riscos tecnológicos ambientais na área urbana da cidade de Manaus-AM. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, Curitiba, v.49, p. 283-304, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v49i0.59260> Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/made/article/view/59260/37469> Acesso em: 14 Maio 2019.

OLIVEIRA, E. L. A; RECKZIEGEL, B. W; ROBAINA, L. E. S. Áreas de risco geomorfológico na bacia hidrográfica do Passo da Areia, Santa Maria / RS. **Boletim Gaúcho de Geografia**, Porto Alegre, v. 30, n. 1, p. 22-34, 2006. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/bgg/article/view/37480/24223> Acesso em: 03 abr. 2021.

OROZCO, M. M. D. **Caracterização da gramínea vetiveria zizanioides para aplicação na recuperação de áreas degradadas por erosão.** 81 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009.

PINTO, L. V. A. **Caracterização física da sub-bacia do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG, e propostas de recuperação de suas nascentes.** 165 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

PINTO, R. C; PASSOS, E; CANEPARO, S. C. Mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa com uso da Avaliação Multicritério pelo método da Média Ponderada Ordenada. **Caderno de Geografia**, Belo Horizonte, v. 25, n. 43, p. 116-143, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2015v25n43p116> Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/geografia/article/view/8276> Acesso em: 16 abr. 2019.

PRATES, M. T. **Sistemas regionais de inovação em tecnologias ambientais: um estudo de caso sobre o Paraná.** 205 f. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2006.

QUITO, V. S. **Estudo sobre a influência das raízes do capim vetiver na permeabilidade de um solo tropical compactado.** 76 f. Projeto de graduação (Graduação em Engenharia Civil) – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

RECKZIEGEL, B. W; ROBAINA, L. E. S; OLIVEIRA, E. L. A. Mapeamento de áreas de risco geomorfológico nas bacias hidrográficas dos Arroios Cancela e Sanga do Hospital, Santa Maria-RS. **GEOGRAFIA (Londrina)**, Londrina, v. 14, n. 1, p. 5-18, 2005. DOI: <http://dx.doi.org/10.5433/2447-1747.2005v14n1p5> Disponível em: <http://www.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/6744> Acesso em: 03 abr. 2021.

REY, F. *et al.* Soil and water bioengineering: practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. **Science of The Total Environment**, [S.l.], v. 648, n. 15, p. 1210-1218, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.217> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718331814> Acesso em: 25 nov. 2019.

ROSA, R. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista Do Departamento De Geografia**, São Paulo, v.16, n.1, p. 81-90, 2005. DOI: <https://doi.org/10.7154/RDG.2005.0016.0009> Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/47288>. Acesso em: 25 out. 2018.

SANTOS, E. C. G. **Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado.** Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007.

SANTOS, T. M. M; OLIVEIRA, J. L. S; SILVA, E. Vulnerabilidade hídrica no Nordeste brasileiro: entre a urbanização e a educação ambiental. **REMEA**, Rio Grande, v. 35, n. 3, p. 184-199, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14295/remea.v35i3.8206> Disponível em: <https://periodicos.furg.br/remea/article/view/8206/5557> Acesso em: 25 nov. 2019.

SCHOR, H. J; GRAY, D. H. **Landforming: an environmental approach to hillside development, mine reclamation and watershed restoration.** Hoboken: Wiley, 2007.

SEITZINGER, S. P. *et al.* Planetary stewardship in an urbanizing world: beyond city limits. **Ambio**, Stockholm, v. 41, n. 8, p. 787-794, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13280-012-0353-7> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-012-0353-7> Acesso em: 14 maio 2019.

SILVA, A. S. **Territorialidades em torno das águas: discursividade e práticas de apropriação e uso dos mananciais em Garanhuns/PE.** 240 f. Tese (Doutorado Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2012.

SILVA, F. M. A; BANDEIRA, A. P. N; RIBEIRO, S. C. Mapeamento de áreas de risco geomorfológicos no distrito do Caldas-Barbalha-CE: caso do núcleo urbano do sítio Riacho do Meio. **Revista Geoaraguaia**, Barra dos Garças, v. 8, n. 2, p. 1-18, 2018. Disponível em: <http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7672>. Acesso em: 10 abr. 2019.

SILVA, A. R. S; SANTANA, M. D. S; PASCOAL, R. M; SILVA, R. N. L. Urbanização desordenada: consequências socioambientais na bacia hidrográfica do Paracuri II, distrito de Icoaraci-PA. **Revista IHGP**, Belém, v. 03, n. 01, p. 31-50, 2016. Disponível em: https://www.ihgp.net.br/revista/index.php/revista/article/view/52/pdf_47 Acesso em: 01 jun. 2020.

SOARES, A. B; SANTOS, C. C; CAVALCANTI, M. A. Problemática socioambiental urbana na nascente Pau Amarelo em Garanhuns – PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S.l.], v. 6, n. 5, p. 1140-1157, 2013. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.5.p1141-1157> Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233101> Acesso em: 15 nov. 2016.

SOARES, A. B. **Análise da problemática socioambiental das nascentes urbanas no município de Garanhuns – PE.** 153 f. Dissertação (Mestrado Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2015.

SOARES, A. B; TROLEIS, A. L. A expansão urbana de Garanhuns-PE entre 1811 e 2016 e suas implicações socioambientais. **Revista Movimentos Sociais e Dinâmicas Espaciais**, Recife, v. 7, n. 1, p. 185-209, 2018. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistamseu/article/view/230751> Acesso em: 23 mai. 2019.

SOARES, A. B; TROLEIS, A. L. Impactos ambientais na qualidade da água da nascente Pau Amarelo em GARANHUNS-PE. **Revista de Geografia**, Recife, v. 34, n. 3, p. 160-185, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/229249> Acesso em: 4 abr. 2021.

SOLIMAN, M. M. **Engineering hydrology of arid and semi-arid regions.** Boca Raton: CRC Press, 2010.

SOUZA, M. N. **Degradação e recuperação ambiental e desenvolvimento sustentável.** 371 f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG, 2004.

SURIBABU, C. R; BHASKAR, J. Evaluation of urban growth effects on surface runoff using SCS-CN method and Green-Ampt infiltration model. **Earth Science Informatics**, [S.l.], v. 8, n. 3, p.609-626, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12145-014-0193-z> Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12145-014-0193-z> Acesso em: 14 maio 2019.

THIEBES, B; BELL, R; GLADE, T; JÄGER, S; ANDERSON, M; HOLCOMBE, L. A WebGIS decision-support system for slope stability based on limit-equilibrium modelling. **Engineering Geology**, [S.l.], v. 158, p. 109-118, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.03.004> Disponível em: https://homepage.univie.ac.at/thomas.glade/publications_journals.html. Acesso em: 28 ago. 2016.

TRIOLA, M. F. **Essentials of Statistics**. 6 ed. New York: Pearson, 2019.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Engineering Field Handbook**, 1992. Disponível em: <directives.sc.egov.usda.gov> Acesso em: 15 Agosto 2016.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **Soil Survey Manual**. [S.l.]: USDA, 2017. Disponível em: https://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/scientists/?cid=nrcs142p2_054262 Acesso em: 01 dez. 2019.

VANACKER, V. *et al.* Linking hydrological, infinite slope stability and land-use change models through GIS for assessing the impact of deforestation on slope stability in high Andean watersheds. **Geomorphology**, [S.l.], v. 52, n. 3-4, p. 299-315, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00263-5](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00263-5) Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X02002635> Acesso em 04 abr. 2021.

WADE, T; SOMMER, S. **A to Z GIS: An illustrated dictionary of geographical information systems**. 1. ed. Redlands: ESRI Press, 2006.

WIEDER, W. R; BOEHNERT, J; BONAN, G. B; LANGSETH, M. **Regridded Harmonized World Soil Database v1.2**. 2014. Disponível em: https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=1247 Acesso em: 01 dez. 2019.

XAVIER, J. P. S. *et al.* Estimativa da erosividade da chuva por diferentes métodos e seu impacto na equação universal de perdas de solo, no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 12, n. 3, p. 859-875, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.3.p859-875> Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/236841> Acesso em: 25 nov. 2019.

ZACHAR, D. **Soil erosion: developments in science 10**. Amsterdã: Elsevier, 1982.