

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DE UMA
SUBUNIDADE HIDROGRÁFICA DA BACIA DO RIACHO
FUNDO

GUILHERME KOICHI DE GODOI SAITO

ORIENTADOR: Prof. WAGNER SANTOS DE ALMEIDA,
DSc

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL II

BRASÍLIA/DF: ABRIL/2022

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DE UMA
SUBUNIDADE HIDROGRÁFICA DA BACIA DO RIACHO
FUNDO**

GUILHERME KOICHI DE GODOI SAITO

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

**WAGNER SANTOS DE ALMEIDA, DSc (ENC/UNB)
(ORIENTADOR)**

**CRISTIANE GOMES BARRETO, DSc (UnB)
(EXAMINADORA INTERNA)**

**RICARDO TEZINI MINOTI, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 29 DE ABRIL DE 2022.

FICHA CATALOGRÁFICA

SAITO, GUILHERME KOICHI Análise de Vulnerabilidade Ambiental de uma subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo.	
ix, 61 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2022) Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.	
1. Indicador de geomorfologia	2. Vulnerabilidade ambiental
3. Erosão	4. Inundação
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Saito, G.K. 2022. Análise de Vulnerabilidade Ambiental de uma subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 61p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Guilherme Koichi de Godoi Saito

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise de Vulnerabilidade Ambiental de uma subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2022

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Guilherme Koichi de Godoi Saito
Guikoichi2011@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente à Universidade de Brasília por todas as oportunidades de conhecer pessoas incríveis, experiências de empresa júnior (Concreta), projeto de iniciação científica (PIBIC) e estágios na NOVACAP, ADASA e no Grupo ZAGO. Mas gostaria de agradecer não só as pessoas, experiências profissionais e experiências acadêmicas, mas principalmente o crescimento pessoal em toda essa trajetória de graduação. Gostaria de agradecer também meu professor orientador, Wagner Santos de Almeida, por todo apoio e orientação e a banca avaliadora, professor Ricardo e Professora Cristiane, pela contribuição com críticas e proposições de melhoras.

E, por último e não menos importante, minha família por todo apoio e conselhos nesta trajetória de graduação, em especial, meu pai, Ricardo Hiromi, por todo o incentivo nos estudos, minha mãe, Micheline, por todos os conselhos e apoios, e minha irmã, Giovanna, por todo o companheirismo.

RESUMO

ANÁLISE DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL DE UMA SUBUNIDADE HIDROGRÁFICA DA BACIA DO RIACHO FUNDO

Autor: Guilherme Koichi de Godoi Saito

Orientador: Wagner Santos de Almeida

A bacia hidrográfica do Riacho Fundo, que abrange a subunidade hidrográfica deste estudo, é uma área com um alto peso de importância para o Distrito Federal (DF), apresentando-se como uma contribuinte direta ao Lago Paranoá, que pode promover processos erosivos e de assoreamento, contendo, também, a Área de Relevante Interesse Ecológico (ARIE) Granja do Ipê, cujo o local deve prezar pela conservação, tendo em vista sua rica e escassa biodiversidade de fauna e flora endêmicas e ameaçadas de extinção. Por isso, este estudo torna-se fundamental na avaliação preliminar de processos erosivos e de ocupação urbanas. Além disso, sobre os processos encontrados nesta bacia, destaca-se: a expansão urbana na Região Administrativa do Riacho Fundo 2, a crescente expansão de áreas agrícolas, rompimento de talude na região Metropolitana e inundação em faixas urbanizadas de Área de Preservação Permanente (APP) na Vila Cauhy, que foram realidades encontradas na subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo que motivaram a análise da expansão das áreas antropizadas, das faixas suscetíveis à inundação e das áreas mais sensíveis aos processos erosivos devido às causas urbanas.

Sendo assim, este presente trabalho de conclusão de curso em engenharia ambiental utilizou o fluxograma de metodologia, primeiramente, de indicadores geomorfológicos com a finalidade de uma avaliação prévia da suscetibilidade do ambiente natural a processos erosivos, em seguida, os mapas de uso e cobertura do solo de diferentes anos de 1984, 2000 e 2019, para avaliar a expansão das classes temáticas antrópicas, o mapa de inundação a partir das camadas de uso e cobertura do solo do ano de 2019, declividade e hipsometria, para avaliar zonas mais suscetíveis à inundação e, por fim, foi elaborado o mapa da vulnerabilidade ambiental com o auxílio da metodologia de Análise Hierárquica de Processos, para avaliar as suscetibilidades aos processos erosivos devido às causas antrópicas.

O mapa final de vulnerabilidade ambiental integra as camadas de suscetibilidade à erosão laminar calculada pela Equação Universal de Perda do Solo (EUPS), a suscetibilidade à erosão linear expressa pelos geoindicadores, a suscetibilidade à inundação e a suscetibilidade

às ações antrópicas que se denota pela evolução das classes temáticas antrópicas. Dessa forma, este projeto final teve como objetivo a avaliação da vulnerabilidade ambiental das áreas mais sensíveis aos processos antrópicos de modificação da área de estudo, de forma que a metodologia empregada possa ser replicada para subsidiar a gestão territorial de áreas similares em bacias hidrográficas do DF, colaborando em tomadas de decisões relacionados ao gerenciamento territorial sustentável de áreas antropizadas.

Na parte de conclusão desta monografia foram encontrados resultados bastante satisfatórios, em que os indicadores geomorfológicos apontaram uma alta tendência a infiltração de água no solo, uma baixa taxa de escoamento superficial e uma baixa suscetibilidade a processos erosivos. Ademais, os mapas de suscetibilidade a erosão laminar e erosão linear, permitiram uma análise macro da subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo quanto a estes processos, já o mapa de suscetibilidade a inundação compatibilizou-se com os pontos monitorados de rompimento de talude na Metropolitana e de inundação na Vila Cauhy, enquanto que o mapa de suscetibilidade as ações antrópicas foram coerentes com a evolução antrópica na área de estudo. Por fim, como última análise, o mapa de vulnerabilidade ambiental permitiu uma visão holística da área de estudo e, no geral, uma forte causalidade dos processos erosivos serem decorridos das ocupações antrópicas no ambiente, tendo em vista que os indicadores geomorfológicos a suscetibilidades a processos erosivos do ambiente em natura demonstraram com valores baixos.

Palavras-chave: Vulnerabilidade ambiental, sistema de informação geográfica, evolução antrópica, geomorfologia, erosão laminar, erosão linear, inundação.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ÁREA DE ESTUDO	2
2	OBJETIVOS	7
2.1	OBJETIVO GERAL.....	7
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
3.1	VULNERABILIDADE AMBIENTAL.....	8
3.2	ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP).....	8
3.3	INDICADORES DE GEOMORFOLOGIA.....	11
3.4	USO E COBERTURA DO SOLO	12
3.5	EROSÃO	13
3.6	ENCHENTES E INUNDAÇÃO	16
3.7	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	18
3.8	MÉTODOS DE PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS.....	18
3.8.1	Equação Universal de Perda do Solo	18
3.9	MODELO QUALITATIVO FUNDAMENTADO EM GEOINDICADORES PARA AVALIAÇÃO DA EROSIÃO LINEAR	22
3.10	ZONEAMENTO AMBIENTAL.....	26
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1	MATERIAIS	27
4.1.1	Softwares	27
4.1.2	Imagens	27
4.1.3	Bases cartográficas.....	27
4.1.4	Dados Pluviométricos e Fluviométricos	28
4.2	MÉTODOS.....	28

4.2.1 Indicadores Geomorfológicos	29
4.2.2 Mapas de Uso e Cobertura do Solo.....	30
4.2.3 Mapa de Suscetibilidade à Erosão Laminar	31
4.2.4 Mapas de Suscetibilidade à Erosão Linear.....	32
4.2.5 Mapas de Suscetibilidade à Inundação.....	33
4.2.6 Mapas de Suscetibilidade às Ações Antrópicas	33
4.2.7 Mapas de Vulnerabilidade Ambiental.....	34
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
5.1 INDICADORES GEOMORFOLÓGICOS	36
5.2 MAPAS TEMÁTICOS DE USO E COBERTURA DO SOLO	37
5.3 ÁREAS SUSCETÍVEIS À EROSÃO LAMINAR	39
5.4 ÁREA SUSCETÍVEIS À EROSÃO LINEAR.....	40
5.5 ÁREA SUSCETÍVEIS À INFLUÊNCIA ANTRÓPICA	44
5.6 ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO.....	45
5.7 VULNERABILIDADE AMBIENTAL.....	49
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	54
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.....	2
Figura 2 - Hidrografia da subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo.	3
Figura 3 - Ponto de rompimento do talude e de inundação com <i>base map</i> do satélite maxar com resolução espacial de 0,3 metros.....	4
Figura 4 - Mapa de pedologia da área de estudo. (Fonte: Embrapa, 2004).....	5
Figura 5 - Mapa do Modelo Digital do Terreno. (Fonte: SEDUH, 2009).....	6
Figura 6 - Mapa de declividade em porcentagem.(Fonte: SEDUH, 2009)	6
Figura 7 - Classificação de processos erosivos.	15
Figura 8 – Exemplos de sulcos, ravinas e voçorocas.	16
Figura 9 - Representação com nomenclatura técnica de inundação em zonas ribeirinhas. Fonte: Tucci (2007).	17
Figura 10 - Metodologia para geração do mapa de suscetibilidade à erosão linear	23
Figura 11 - Metodologia para produção do mapa de vulnerabilidade ambiental (adaptado de Almeida <i>et al.</i> , 2012)	29
Figura 12 - Mapa de uso e cobertura do solo para os anos de 1984, 2000 e 2019.....	37
Figura 13 - Mapa dos fatores componentes da suscetibilidade à erosão laminar.....	40
Figura 14 - Mapa de suscetibilidade à erosão laminar.	40
Figura 15 - Mapa Geopedológico da área de estudo.	41
Figura 16 - Mapa de vulnerabilidade da declividade.	42
Figura 17 - Mapa de suscetibilidade à erosão linear.	43
Figura 18 - Mapa de Risco de Perda de Solo por Erosão.	44
Figura 19 - Mapa de suscetibilidade as ações antrópicas.	45
Figura 20 - Mapa de suscetibilidade à inundação da área de estudo.....	46
Figura 21 - Mapa de localização do ponto de inundação na Vila Cauhy e de rompimento do talude conjuntamente com a camada de suscetibilidade à inundação.	47
Figura 22 - Registro fotográfico do rompimento do talude. (Agência Brasília, 2019)	48
Figura 23 - Registro fotográfico de noticiário que mostram efeitos da inundação ocorrida. (Metrópoles, 2021)	48
Figura 24 - Comparação do antes(maio/2018) e depois do rompimento do talude(maio/2019).....	49
Figura 25 - Mapa de Vulnerabilidade Ambiental.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala fundamental proposta por Saaty (1980) da AHP.	9
Tabela 2 - Valores de Índice Aleatório.....	10
Tabela 3 - Valores de erodibilidade (fator K).....	20
Tabela 4 - Valores de referência para os fatores C e P.....	22
Tabela 5 - Valores de vulnerabilidade da geologia.	23
Tabela 6 - Valores de vulnerabilidade da pedologia.	23
Tabela 7 - Atributos de referência no cruzamento do mapa de geopedologia. (Adaptado de Campagnoli, 2002)	24
Tabela 8 - Valores de referência da vulnerabilidade da declividade.	25
Tabela 9 - Atributos de referência no cruzamento do mapa de geopedologia com o de declividade (Adaptado de Campagnoli, 2002).	25
Tabela 10 - Graus de vulnerabilidade das classes antrópicas do uso e cobertura do solo... 34	
Tabela 11 - Resultados dos índices de “Densidade de Drenagem” e “Gradiente de canais”.	36
Tabela 12 - Quantitativo de áreas em Km ² do uso e cobertura do solo.....	38
Tabela 13 - Graus de vulnerabilidade da declividade.....	42
Tabela 14 - Matriz de comparação paritária dos fatores da vulnerabilidade ambiental.....	50
Tabela 15 - Normalização dos autovetores.....	50
Tabela 16 - Soma do produto matricial dos valores da comparação pareada com os pesos.	51
Tabela 17 - Valores de Índice Aleatório.....	51

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

% - Porcentagem

ADASA - Agência Reguladora de águas, Energia e Saneamento do Distrito Federal.

AHP - Análise Hierárquica de Processos

ANA - Agência Nacional de Águas

C - Fator de Uso e Manejo do Solo

CN - *Curve Number*

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DF - Distrito Federal

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária

EUPS - Equação de Perda do Solo

GPS - *Global Positioning System*

HEC-HMS - *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*

HEC-RAS - *Hydrologic Engineering Center's - River Analysis System*

IDF - Intensidade Duração e Frequência

INPE - Instituto Nacional de Pesquisa Espacial

IVDN - Índice de vegetação por diferença normalizada

K - Fator de Erodibilidade do Solo

LS - Fator Topográfico

MDE - Modelo Digital de Elevação

MNT - Modelo Número de Terreno

P - Fator de Práticas Conservacionistas

R - Fator de Erosividade da Chuva

RA - Regiões Administrativas

RHN - Rede Hidrometeorológica Nacional

SCS - *Soil Conservation Service*

SIG - Sistema de informação Geográfica

UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

UnB - Universidade de Brasília

ZEE - Zoneamento Ecológico-Econômico

1 INTRODUÇÃO

O processo de urbanização de modificação do ambiente em natura, em área antes cobertas por vegetação nativa com o manejo antrópico, gera uma série de impactos erosivos e hídricos que, se não forem controlados adequadamente, podem gerar riscos de assoreamento, alagamento, inundação e poluição dos corpos hídricos (ADASA, 2018).

No Brasil, devido às chuvas intensas que inundam áreas urbanas em municípios, ocorre de taludes serem rompidos em regiões de moradias, proporcionando processos de erosões laminares e lineares, desencadeando sulcos, ravinas e voçorocas, entre outros impactos socioambientais. Esses eventos são decorrentes dos intensos processos de urbanização que não levam em consideração diversos fatores como: os impactos hídricos de aumento da taxa de impermeabilização, o planejamento na infraestrutura de baixo impacto quanto a um futuro aumento populacional na distribuição de água, no esgotamento sanitário e na drenagem urbana, apresentando-se como requisitos fundamentais no planejamento urbanístico sustentável.

Nesta perspectiva é fundamental a elaboração de planos diretores e estratégicos de zoneamento urbano no planejamento de ocupação urbanística como ações para o planejamento da ocupação urbana, sendo o mapeamento de áreas suscetíveis a processos erosivos e eventos extremos de inundação, fatores com um alto peso de importância, tendo em vista sua intensificação por processos de urbanização não planejada, como as ocupações em zonas de Área de Preservação Permanente (APP), a retirada da vegetação e a impermeabilização do solo, que têm como consequência o aumento do escoamento superficial, o aumento da velocidade do fluxo de vazão nos rios e o aumento de resíduos advindo do arraste das águas pluviais, desencadeando um fenômeno cada vez mais expressivo de poluição hídrica e de erosão.

No presente projeto final, buscando a identificação e avaliação de áreas vulneráveis aos processos erosivos e áreas suscetíveis à inundação foi realizada, primeiramente, a avaliação dos processos erosivos condicionados a um ambiente em natura pelos indicadores geomorfológicos e, posteriormente, a modelagem da vulnerabilidade ambiental para os processos erosivos em um ambiente antropizado, além de análises parciais dos fatores de erosão laminar, de erosão linear, de inundação e de ações antrópicas que são incorporadas nessa modelagem.

Segundo Almeida *et al.* (2017), a análise de vulnerabilidade ambiental é uma ferramenta importante por concatenar diversos aspectos físicos do território, de modo a possibilitar a

observação do ambiente de maneira holística e integrada. Permite, sobretudo, visualizar as interferências antrópicas sobre o meio, o que é fundamental, diante da intensificação de diversos impactos ambientais ao longo dos últimos anos, tais como: desmatamentos, aumento dos níveis de erosão, deterioração na qualidade das águas e uso inadequado do solo. Dessa maneira, para o auxílio no planejamento territorial e mapeamento de áreas suscetíveis à erosão e inundação na subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo, este estudo se baseou na metodologia trazida pelos autores Almeida *et al.* (2017) com a análise de vulnerabilidade ambiental que integra os fatores de pedologia, geologia, hipsometria, intensidade da chuva e vazão, uso e cobertura do solo, com o objetivo de subsidiar futuras análises de planejamento urbanístico e de zonas mais sensíveis como tomada de decisão, permitindo uma visão mais crítica frente à gestão territorial que preza pela ocupação urbanística de zonas seguras, com saneamento, drenagem urbana e gestão adequada dos resíduos sólidos.

1.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo deste trabalho localiza-se na subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo, em Brasília, Distrito Federal, inseridos entre as coordenadas de Latitude Sul igual a 15°51' 09 e 15°57'48 e de Longitude Oeste entre 48°03'51 e 47°57'36” com uma área de aproximadamente 7470,6 hectares, apresentada na Figura 1.

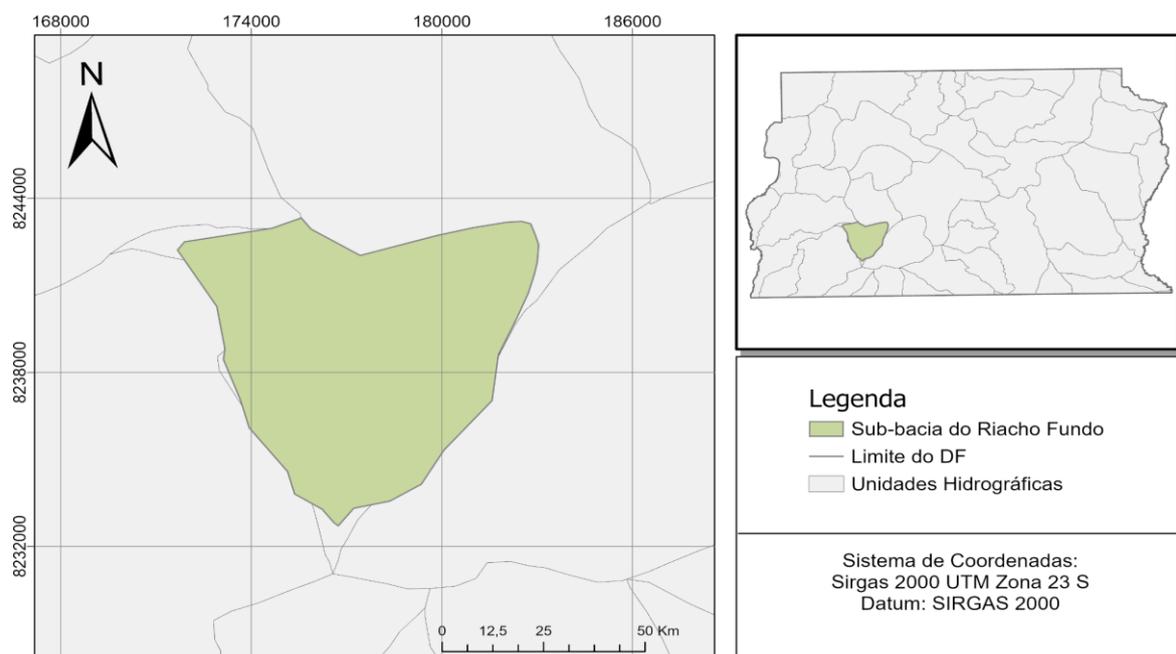


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

A escolha deste recorte da subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo, explicitado pela Figura 1, deu-se com o objetivo de realizar uma análise preliminar local de vulnerabilidade ambiental, focando na relação entre os processos de erosão e inundação com a Região Administrativa do Riacho Fundo 2 e os pontos monitorados de rompimento de talude na Metropolitana e de inundação na Vila Cauhy, ambas no Núcleo Bandeirante.

A subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo apresenta, conforme a Figura 2, uma hidrografia definida pelos córregos do Riacho Fundo, Coqueiros, Açudinho e Capão preto que tem como contribuintes regiões agrícolas, rurais e urbanas. Dentre as regiões urbanas dessa área de estudo destaca-se a Região Administrativa do Riacho Fundo 2 devido ao seu processo de expansão urbana ser recente, menos consolidada e com mais suscetibilidade à processo de erosão, sendo este um dos fatores motivacionais da escolha da área de estudo.

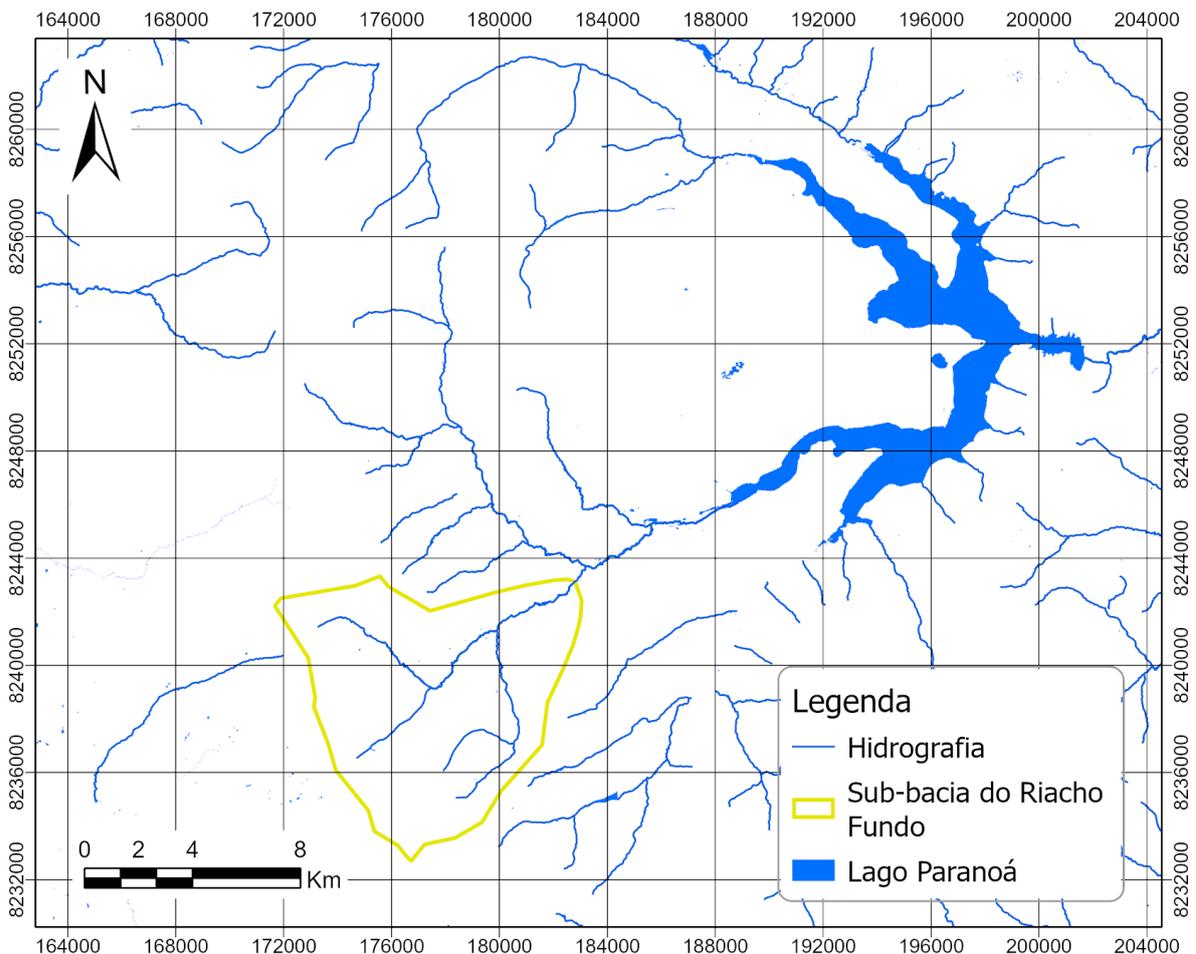


Figura 2 - Hidrografia da subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo.

Outro fator que motivou a escolha da área de estudo foi o mapeamento de dois pontos que foram marcantes: o rompimento do talude na Metropolitana, Núcleo Bandeirante (Agência

Brasília, 2019) e a inundação constante da Vila Cauhy, Núcleo Bandeirante (Metr poles, 2021), apresentados na Figura 3 desses pontos na subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo.

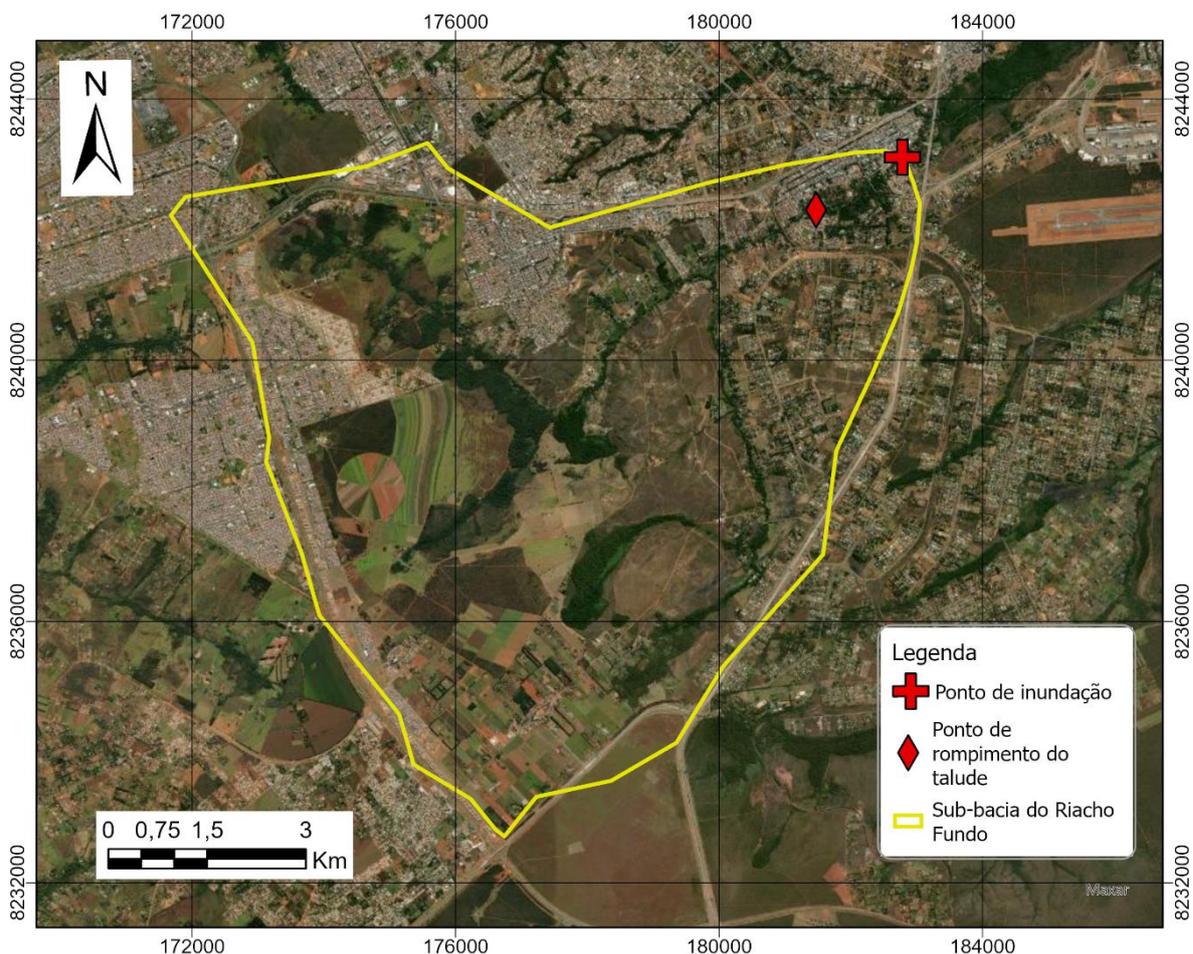


Figura 3 - Ponto de rompimento do talude e de inunda o com *base map* do satélite maxar com resolu o espacial de 0,3 metros.

Sobre as características físicas da área de estudo: a pedologia   marcada, principalmente, de Latossolos Vermelhos, que apresentam baixa fertilidade e um alto teor de ferro (Ageitec, Embrapa, 2022), e o Cambissolo Háplico, que apresenta textura argilosa comumente cascalhenta e, geralmente, baixa fertilidade com alguns pontos de alta fertilidade (Ageitec, Embrapa, 2022), como mostra na Figura 4. Além disso, a área tem uma altimetria com amplitude que varia de 725 a 1340 metros de altitude e uma declividade com varia o de 0 a 39 por cento, como apresentado nas Figuras 5 e 6.

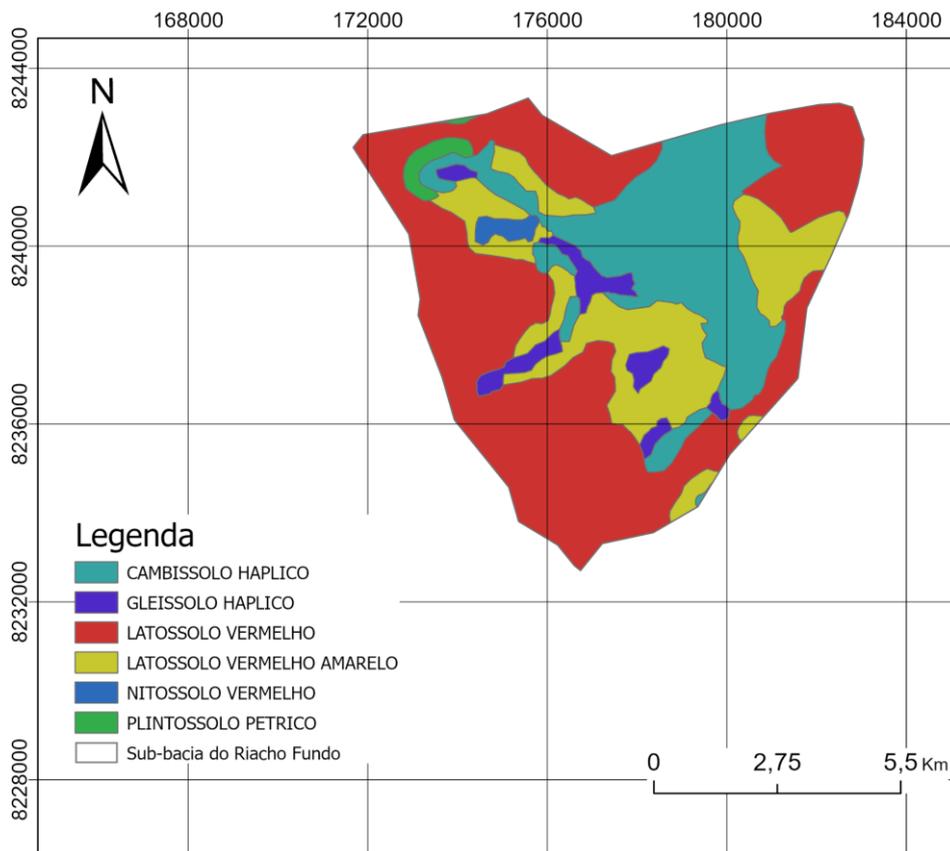


Figura 4 - Mapa de pedologia da área de estudo. (Fonte: Embrapa, 2004)

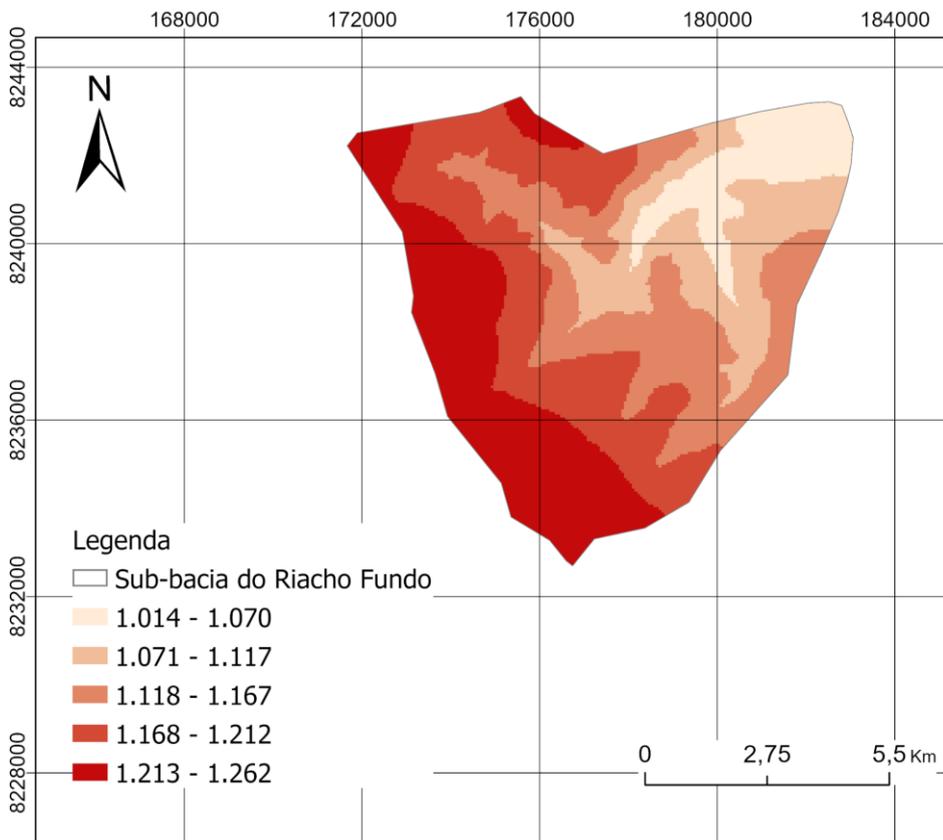


Figura 5 - Mapa do Modelo Digital do Terreno. (Fonte: SEDUH, 2009)

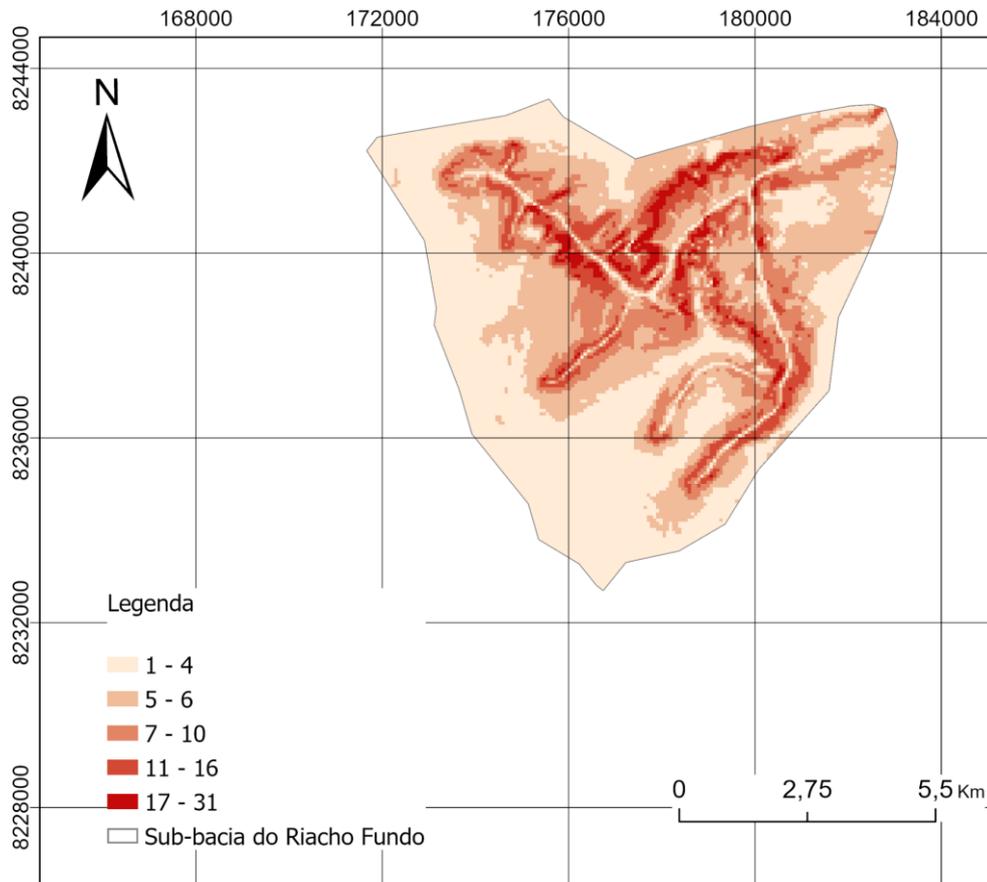


Figura 6 - Mapa de declividade em porcentagem.(Fonte: SEDUH, 2009)

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente projeto final tem como objetivo geral identificar e avaliar áreas ambientalmente vulneráveis na subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo, para que seja possível o levantamento de áreas mais suscetíveis a processos erosivos e à inundação, assim como suas possíveis causalidades e correlações com os demais fatores físicos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do presente projeto final são:

- Avaliar a evolução urbana e alterações ocorridas por meio do uso e cobertura do solo para os anos de 1984, 2000 e 2019;
- Avaliar e identificar zonas mais suscetíveis à inundação;
- Avaliar e identificar áreas mais vulneráveis e suscetíveis às erosões laminares e lineares.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Segundo Tagliani (2003), a vulnerabilidade ambiental pode ser definida como sendo qualquer suscetibilidade de um ambiente a um impacto potencial provocado por um uso antrópico qualquer.

Outra definição que se tange com essa conceituação trazida por Tagliani (2003) é a do Ministério do Meio Ambiente (Santos *et al.*, 2007) que trata, primeiramente, da vulnerabilidade como sendo a interação entre os aspectos intrínsecos a cada condição natural do território com os eventos antrópicos induzidos a este mesmo ambiente, causando efeitos socioambientais diversos.

Assim, para se conseguir mensurar a vulnerabilidade ambiental é necessário conhecer quais são essas características intrínsecas da área de estudo, e como esses eventos estão impactando o ambiente em questão. Segundo Santos *et al.* (2007), para se conhecer ainda mais como essas interações se dão, é importante entender dois pontos: a persistência, que é a medida de quanto um ambiente, ao ser perturbado, se afasta do seu equilíbrio, e a resiliência, que é a capacidade do sistema ou meio de conseguir retornar ao seu ponto de equilíbrio; ou seja, um ambiente com baixas persistência e resiliência é um ambiente extremamente vulnerável.

A análise de vulnerabilidade ambiental foi uma ferramenta fundamental no desenvolvimento deste projeto final, pois permitiu a concatenação de diversas características físicas, morfológicas e antrópicas, permitindo uma visão holística e ampla de áreas mais suscetíveis à vulnerabilidade ambiental supramencionada. Para isso, foi utilizada a análise multicritério conhecida como Análise Hierárquica de Processos (AHP), em que são integrados dados de características territoriais com a atribuição de pesos com relação ao seu fator de importância no impacto ao meio ambiente, conforme explicitado no item 3.2.

3.2 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP)

O método multicritério de Análise Hierárquica de Processos foi desenvolvido por Thomas Saaty em 1980, sendo utilizado no âmbito das tomadas de decisões com mais de 1500 métodos que os descrevem (Lambert Torres *et al.*, 2007). Ainda segundo Lambert Torres *et al.* (2007), a modelagem AHP tomou notoriedade devido ao fato de ser uma modelagem que se assemelhe com a mente humana, em que, ao se deparar com uma situação de tomada de

decisão com um número elevado de elementos em uma situação complexa, a mente humana tende a diferenciar as alternativas dentro dos elementos para avaliação e entendimento dos aspectos a serem levados em consideração e hierarquia frente ao objetivo geral.

Segundo Saaty (1980) *apud* Lambert Torres *et al.* (2007) , os elementos fundamentais do método AHP são: critérios, que são os conjuntos finitos de alternativas; a hierarquia, que é o ordenamento agrupado dos conjuntos de critérios; as comparações paritárias, que são comparações das alternativas realizadas em pares para estabelecimento de uma comparação de preferências entre elas; e a escala fundamental, em que são dados números na comparação paritária, na qual “9” é um valor atribuído de máxima importância e “1/9”, sua inversa, é dada como uma alternativa de menor importância em relação a outra, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Escala fundamental proposta por Saaty (1980) da AHP.

Valores	Importância Mútua
1/9	Extremamente menos importante que
1/7	Muito fortemente menos importante que
1/5	Fortemente menos importante que
1/3	Muito Fortemente menos importante que
1	Igualmente importante a
3	Mais importante que
5	Muito fortemente mais importante que
7	Fortemente menos importante que
9	Extremamente mais importante que

A partir desses valores referência da escala fundamental proposta por Saaty (1980), começa a etapa primária da aplicação do método AHP, que é o julgamento paritário, em que se avalia comparativamente um fator em relação ao outro acerca da sua influência e importância frente ao objetivo final.

Em seguida, como etapas subsequentes, é analisada a consistência da matriz comparativa com o intuito de verificar a confiabilidade dos julgamentos realizados. Dessa forma, como etapas consecutivas desta análise: normaliza-se os valores atribuídos da matriz, calcula-se o autovetor ou média de cada fator, calcula-se A_w pela multiplicação da matriz inicial com a

matriz dos autovetores, o λ máximo tirando a média da somatória da divisão dos valores de Aw pelos autovetores, o Índice de Coerência e a Razão de Coerência pelas equações 1 e 2, além do auxílio da Tabela 2 que demonstra o índice aleatório presente na equação 2 de Razão de Consistência apresentada a seguir.

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (1)$$

Em que,

IC = Índice de Coerência

$\lambda_{máx}$ = autovalor máximo

n = dimensão de matriz

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (2)$$

Em que,

RC = Razão de Consistência

IC = Índice de Coerência

IA = Índice Aleatório

Tabela 2 - Valores de Índice Aleatório.

Dimensão da matriz (i,j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coerência aleatória	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Sendo assim, após esses cálculos sequenciais, deve-se verificar se o valor encontrado de Razão de Coerência é menor do que 0,1, no qual valores dentro desse intervalo pode-se considerar a matriz comparativa como sendo coerente; no entanto, para valores maiores do que 0,1, deve-se avaliar a matriz inicial, pois dentro da metodologia exposta por Saaty (1980) denota-se como uma matriz comparativa incoerente, ou seja, não representativa.

Portanto, o uso desta ferramenta AHP neste trabalho de análise de vulnerabilidade ambiental possui uma relevância significativa na atribuição de pesos das camadas de suscetibilidade às ações antrópicas, à erosão linear, à erosão laminar e às inundações para a produção do mapa final de vulnerabilidade ambiental.

3.3 INDICADORES DE GEOMORFOLOGIA

Segundo Crepani, Valeriano e Martini (2022), a geomorfologia pode ser conceituada a partir da origem e da estrutura do relevo e das características das rochas, do clima e de fatores endógenos e exógenos que formam os elementos da superfície terrestre. Tais características influenciam os processos erosivos de bacias hidrográficas, podendo ser potencializados pela interferência antrópica. Portanto, os indicadores geomorfológicos propiciam uma análise do ambiente em condições naturais sem a interferência antrópica, ou seja, é um indicador prévio da suscetibilidade àquele ambiente sofrer processos erosivos e/ou de assoreamento.

Em condições naturais, a geologia conjuntamente com as características da morfologia fluvial determina o padrão de drenagem do curso d'água, no qual propicia uma tendência de menor ou maior energia de transporte de sedimentos. Porquanto, o uso antrópico do solo influencia diretamente na velocidade com que esses processos erosivos e arraste de sedimentos se dão, podendo se apresentar de diversas formas na prática de atividades agrícolas, na expansão urbana e na ocupação ribeirinha, onde esses padrões de uso antrópico potencializam a impermeabilização do solo, desproteção do solo e aumento da quantidade e velocidade do escoamento superficial. (Almeida *et al.*, 2013).

Neste cenário, os fatores poderiam ser mitigados pela cobertura vegetal em zonas próximas ao rio e nascentes, e uma melhor gestão de drenagem urbana que preveja a diminuição da velocidade e direcionamento das águas pluviais, pensando na infiltração destas águas. Dessa maneira, com o intuito de avaliar previamente a bacia hidrográfica deste estudo acerca da suscetibilidade a processos erosivos a partir das características geomorfológicas, optou-se por dois indicadores contidos no estudo de Almeida *et al.* (2013): o índice “Densidade de drenagem” (Dd) e o Índice “Gradiente de canais” (Gc).

O índice Densidade de drenagem (Dd), segundo Horton (1945), é dado pela relação entre comprimento total de canais de uma bacia e sua área total, no qual expressa a permeabilidade e o acondicionamento do escoamento superficial quanto ao comportamento hidrológico.

Em contrapartida, o índice Gradiente de canais (Gc) é dado em porcentagem pela relação entre a amplitude altimétrica das cotas à montante e jusante do canal e o comprimento do canal principal, em que, segundo Horton (1945), além de indicar a declividade do curso d'água, também permite avaliar a capacidade de provocar processos erosivos em seus canais.

3.4 USO E COBERTURA DO SOLO

O mapeamento do uso e cobertura do solo para diferentes anos, acrescido do estudo de suscetibilidade às erosões, às inundações e à ocupação urbana, é de fundamental importância no estudo de vulnerabilidade ambiental, devido a sua inter-relação com os diversos aspectos, que podem acarretar uma urbanização desorganizada e sem planejamento.

As inundações e erosões são potencializadas pela supressão vegetal, exposição e impermeabilização do solo, resultando no aumento do escoamento superficial e na diminuição da infiltração da água no solo. Dessa forma, o estudo preciso da ocupação da região da subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo faz-se primordial para um bom entendimento das mudanças ocorridas e como elas influenciam no levantamento de áreas mais vulneráveis e que merecem uma maior atenção em sua gestão.

Os usos de imagens digitais de sensores remotos são fundamentais para obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo, utilizando algoritmos de registro e processamento de imagens e de classificação temática.

O registro de imagens se conceitua como uma transformação geométrica que relaciona as coordenadas da imagem, linhas e colunas de pixel, com as coordenadas geográficas, latitude e longitude, com base em mapas já georreferenciados ou pontos de controles com coordenadas geográficas. A transformação é executada no processo de formação da imagem para se eliminar distorções existentes na imagem, calibrações radiométricas e remoção de ruídos (INPE, 2002).

No processamento de imagens são aplicados algoritmos de tratamentos das imagens com o intuito de realçar e melhorar a qualidade visual sob a ótica humana (INPE, 2002), permitindo que as diversas classes temáticas sejam reconhecidas e distintas sob as refletâncias originadas dos sistemas de sensores a partir das condições de iluminação.

A classificação temática é o processo de extração de informação em imagens para reconhecer padrões e objetos homogêneos (INPE, 2002). Existem duas formas de serem realizadas: o “pixel a pixel”, em que se utilizam isoladamente cada pixel para compor as regiões homogêneas e as “por regiões”, na qual se divide em duas partes: primeiro a segmentação, onde é dividido as regiões em conjuntos de pixel contíguos, espalhando-se de forma bidirecional e que apresentam uniformidade; por segundo, a classificação dessas regiões subdivididas de acordo com sua categorização temática (mata de galeria, cerrado, área urbana, por exemplo).

Por fim, com a elaboração do mapa temático de uso e cobertura do solo a partir dos passos supramencionados, torna-se possível analisar a evolução da ocupação do espaço quanto a suas classes temáticas de cobertura vegetal e antrópicas, quantitativamente e qualitativamente, podendo entender e propor conclusões e medidas de mitigação no planejamento do espaço ocupado dentro da bacia hidrográfica da área de estudo.

3.5 EROSÃO

A terminologia erosão, proveniente do latim *erodere*, pode ser definido como um conjunto de processos pelos quais os materiais terrosos e rochosos da crosta terrestre são desagregados, desgastados ou dissolvidos e transportados pela ação dos agentes erosivos (IPT, 1986). Dentre os principais agentes erosivos dinâmicos naturais estão: a água, o vento, a gravidade, a neve, a ação dos micro-organismos e outros eventos naturais (tremores de terras, degelo, dentre outros) causadores de deslocamentos de massas (Carvalho, 2001). No entanto, são os agentes antrópicos que causam maior impacto erosivo no meio, pois eles aceleram o processo de desgaste e perda de solo em um curto período como: ocupação de lotes com impermeabilização, desmatamentos, atividades agrícolas, abertura de estradas e mudanças na qualidade e regime dos corpos hídricos.

Um dado importante a ser trazido em termos quantitativos para o Brasil realizado por Hernani *et al.* (2002) é que cerca de 822,7 milhões de toneladas são advindos das perdas anuais de solo em áreas de pastagens e lavouras, resultando em uma perda total de aproximadamente US\$ 2,93 bilhões por ano para as propriedades rurais. Os autores afirmam ainda que a erosão é responsável por um prejuízo de cerca de US\$ 4,24 bilhões por ano no País. Vale ainda a análise que, as erosões são responsáveis por carrear sedimentos aos rios e lagos, assoreando-os e prejudicando na qualidade para a fauna local, assim como na eutrofização e desoxigenação, tendo em vista que muitos nutrientes advindos das zonas agrícolas são depositados nos corpos hídricos.

Desse modo, a erosão é responsável pelo assoreamento de rios, depreciação da qualidade de corpos hídricos, eutrofização de lagos e, até mesmo por mortes no solapamento de taludes, trazendo como resultado o empobrecimento dos rios com menos vida que, em consequência, diminui as atividades econômicas dependentes do ambiente aquático. Portanto, é importante o entendimento dos conceitos atrelados à erosão, como ela atua e como se divide, para que sejam traçados planos de ações efetivos frente às problemáticas que ela pode trazer.

Classificação de Erosões

Segundo Camapum *et al.* (2006), a erosão pode ser classificada na forma como surgiu: erosão natural/geológica que ocorre na superfície terrestre em equilíbrio com a formação dos solos ao longo do tempo geológico; e em erosão antrópica, que tem como característica principal ser mais acelerada do que a erosão natural, na qual pode ser visualizada em atividades humanas em uma escala de tempo menor.

No Brasil, devido a suas características climáticas, existem dois fatores importantes que ocorrem nos processos erosivos que devem ser considerados na erosão hídrica: a erosividade da chuva e a erodibilidade do solo. A erosividade é definida como a capacidade de ação do agente erosivo em causar o destacamento e o transporte do solo. Em contrapartida, a erodibilidade é vista como a resistência do solo ao processo erosivo, incluindo, além de suas características intrínsecas, fatores secundários, como os ciclos de interação com o meio externo de umidade, secagem e de interação com o solo. (Lima *et al.*, 2017).

Outra classificação frequentemente utilizada apresenta-se como: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica, apresentada na Figura 7. No presente trabalho foi dado mais ênfase na erosão hídrica, pela motivação de ser a mais influente e causadora de prejuízos econômicos, sociais e ambientais como já mencionado. A erosão hídrica, segundo Jesus (2013), pode ser subdividida em pluvial, fluvial e marinha. Seguindo a cadeia, a erosão pluvial pode ser subdividida em laminar e linear. Para o presente projeto, foi dado enfoque à erosão pluvial, a laminar e a linear, com a finalidade de análise da vulnerabilidade ambiental.

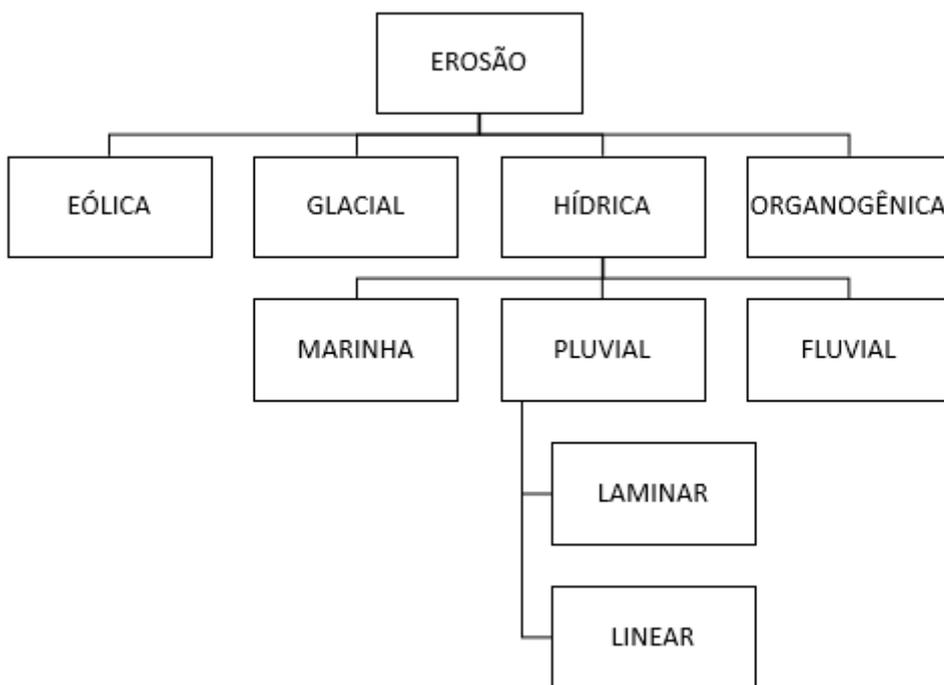


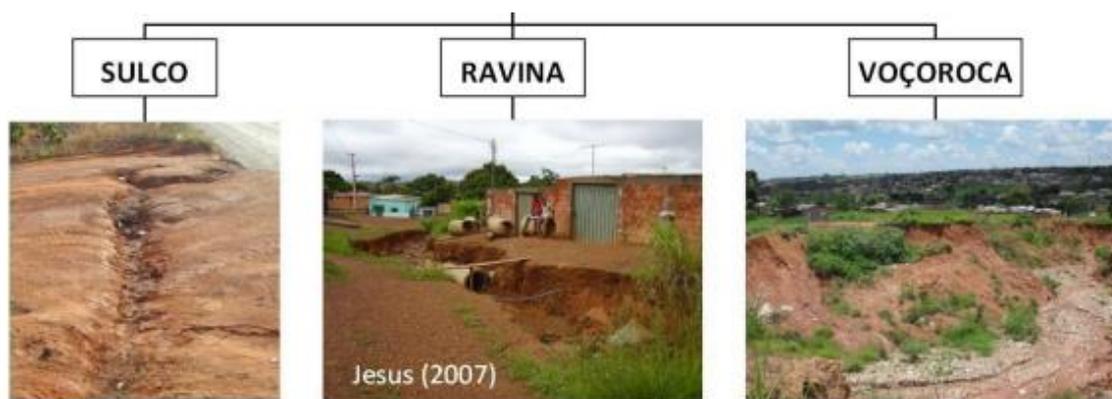
Figura 7 - Classificação de processos erosivos.

Fonte: Adaptado de Jesus (2013)

A erosão pluvial se dá pelo impacto das gotas sobre o solo e pelo escoamento superficial resultante da precipitação. Sendo assim, o destacamento das partículas pela ação das gotas de chuva se dá o nome de salpicamento, podendo ocorrer inclusive em áreas planas, pois a energia erosiva da água provém do movimento de queda e espalhamento das gotas de água com o impacto sobre a superfície do solo. (Lima *et al.*, 2017)

A erosão laminar é causada pelo fluxo de uma lâmina de água em solos com poucos obstáculos, como rochas ou vegetação, acontece por desgastes uniformes e suaves em toda a continuidade de uma camada superficial de solo, durante fortes chuvas (Macêdo, 2009). Esse tipo de erosão ocorre predominantemente em áreas rurais, mas podem ocorrer em outras áreas também como urbanas, periurbanas e vias não pavimentadas (Lima *et al.*, 2017). Vale ressaltar que esse tipo de erosão gerado pelo escoamento superficial é responsável pelo assoreamento e carreamento de solos férteis que são grandes contribuidores de nutrientes para o ambiente aquático, possibilitando o habitat propício à eutrofização.

A erosão linear ocorre quando há fluxos concentrados de água de escoamento superficial ocasionando incisões no solo, sequencialmente, na forma de sulcos, ravinas e voçorocas. Os sulcos são pequenas incisões em forma de filetes muito rasos. As ravinas, por sua vez, são mais alongadas e mais compridas com larguras e profundidades variáveis. Por fim, as voçorocas apresentam formas complexas, muito profundas, alongadas e, em geral, ramificadas, resultantes de uma forma mais agressiva de erosão linear extremamente difíceis de remediação (Oliveira, 1994, Cerri *et al.*, 1997) como mostra a Figura 8 a seguir.



Fonte: Jesus (2013).

Figura 8 – Exemplos de sulcos, ravinas e voçorocas.

Além disso, outra definição trazida por Camapum de Carvalho *et al.*, (2001) indicam que a cronologia se inicia com os sulcos, que se limitam a profundidade de 10 cm, e pode evoluir para os estágios de ravinas, as quais se evoluem até o estágio na qual a estabilidade dos taludes é rompida pelas forças de cisalhamento da água, virando assim uma voçoroca.

3.6 ENCHENTES E INUNDAÇÃO

As enchentes, segundo o Glossário da Defesa Civil (Castro, 1998), são elevação do nível d'água em um corpo hídrico acima do nível de sua vazão normal, extravasando, em vezes, a calha menor em direção a calha maior, trazendo maior risco a população ribeirinha nos eventos extremos de precipitação.

As enchentes urbanas segundo Tucci (2007) podem ser consequências de dois processos: as enchentes em área ribeirinhas, que são causadas pela ocupação irregular e ausência de planejamento de uso e ocupação que afetam as populações com benfeitorias em zonas marginais ao rio; e a urbanização, que são enchentes provocadas pela ocupação e modificação antrópica.

A inundação por sua vez tem um conceito bastante parecido com a enchente. Ainda segundo o Glossário da Defesa Civil (Castro, 1998), as inundações podem ser definidas como um transbordamento da água da calha normal de rios (leito menor), lagos e mares ou acumulação

de águas geralmente em regiões com relevos mais baixos devido a uma deficiente estrutura de drenagem em áreas comumente não submersas. Ou seja, pode-se notar que as inundações são consequências de um forte evento de subida do nível d'água que acaba acarretando um extravasamento das margens do leito menor, como pode ser visto na Figura 9.

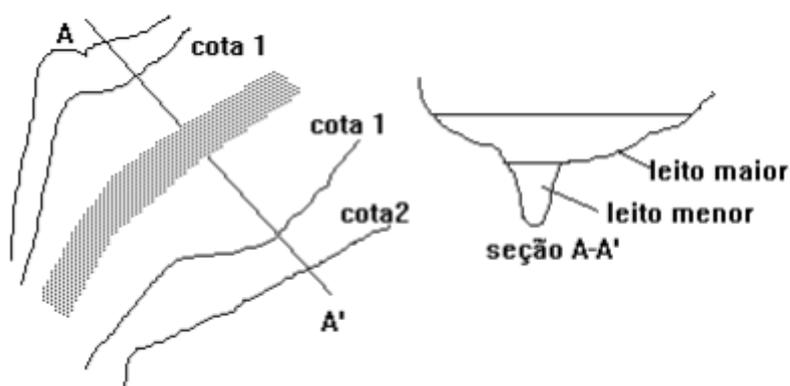


Figura 9 - Representação com nomenclatura técnica de inundação em zonas ribeirinhas.

Fonte: Tucci (2007).

Sobre as classificações das inundações, segundo o Glossário da Defesa Civil (Castro, 1998), podem ser dadas em função de sua magnitude, padrão evolutivo, causas antrópicas ou naturais. Logo, o entendimento do processo evolutivo das enchentes e inundações são de fundamental importância, motivada pelos seus altos prejuízos anuais que estes processos podem vir a acarretar.

Portanto, pode-se notar que as cidades tendem a urbanização cada vez mais acentuada com impermeabilização de solos, desmatando a cobertura vegetal e ocupando zonas costeiras, para se apropriar de terrenos, que acabam tendo como consequência as: enchentes, inundações e erosões devido a fragilidade do solo, taludes e falta de planejamento. A vista disso, é relevante que se mapeie essas áreas mais vulneráveis e suscetíveis a essas inundações e enchentes através de análises com ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), que integram camadas de informações e permite visualizar o ambiente com uma ótica holística da área de estudo, permitindo traçar um planejamento urbano que preza pela sustentabilidade do ambiente, ocupação segura equilibrada a fauna, flora e aspectos sociais.

3.7 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O Sistema de Informação Geográfica (SIG) pode ser entendido como a integração de dados georreferenciados em um ambiente computadorizado que permite a reprodução de fenômenos terrestres reais. Tem-se como funcionalidade captar, armazenar, visualizar, manipular, interpretar/analisar, exportar os dados geográficos com a finalidade de uma correta e eficiente gestão dos recursos naturais, assim como os impactos antrópicos associados ao uso desses ambientes. (MENDONÇA *et al.*, 2011, p. 5 Apud Menezes *et al.*, 2017).

A utilização do SIG para resoluções de problemas frente às problemáticas antrópicas de ocupação intensa de urbanização, impermeabilização do solo, poluição de rios e meio urbano, tornou-se etapa fundamental na análise desses impactos, ao qual permite a integração de dados como pedologia, geologia, uso e cobertura do solo, topografia e muitas outras características, que podem ser inseridas, armazenadas e manipuladas, para análises de situações reais do estado físico ou para previsões futuras, resultando-se em forma de produtos cartográficos (mapa), tabelas ou gráficos de apresentação. (SANSOLO *et al. apud* CÂMARA, 2008, p. 4).

Dessa maneira, o SIG foi a ferramenta base na avaliação dos processos erosivos da ocupação enfrentada na área de estudo, a partir de feições de pedologia, geologia, topografia, uso e cobertura do solo, intensidades de chuvas, informações estas que foram integradas para nortear tomadas de decisões futuras em um planejamento territorial mais eficiente.

3.8 MÉTODOS DE PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

3.8.1 Equação Universal de Perda do Solo

A Equação Universal de Perda do Solo (EUPS), desenvolvida por Wichmeier e Smith (1978), é um modelo empírico largamente utilizado com a finalidade de quantificar as perdas de solo por erosão laminar. O modelo em questão é uma ferramenta ideal na aplicabilidade em áreas de agricultura e para estudos de processos erosivos. Além disso, o modelo se baseia em um equacionamento com diversos parâmetros como será mostrado a seguir pela equação 3:

$$A = R.K.LS.C.P \quad (3)$$

onde,

A = perda de solo [(ton.)/(ha.ano)]

R = fator de erosividade da chuva [(MJ.mm)/(ha.h)]

K = fator de erodibilidade do solo [(ton.h)/(MJ.mm)]

LS = fator topográfico, do qual pode ser dividido em fator L, como comprimento de rampa; e o fator S, como sendo o fator declividade [adimensional]

C = fator de uso e manejo do solo [adimensional]

P = fator práticas conservacionistas [adimensional]

Assim sendo, o equacionamento mostrado anteriormente é a base para a confecção do mapa final de erosão laminar, para isso é utilizado software de SIG, o sistema Arcgis, como uma ferramenta de integração com álgebras de mapas. Ademais, são efetuados os mapas de cada parâmetro supracitado no equacionamento.

3.8.1.1 Fator de Erosividade da Chuva (R)

O fator R expressa o potencial da água da chuva em desagregar e transportar o solo e seus particulados por meio do escoamento superficial. Este potencial é visto como uma função da intensidade da chuva, tamanho das partículas e distribuição espacial dessa chuva.

Para obtenção do fator R, seguiu a metodologia sugerida por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), onde é calculada a erosividade da chuva de cada mês a partir da equação 4, que se enquadra como a mais adequada para a realidade intertropical, segundo o autor.

$$EI_{30} = 67,355 \cdot \left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,85} \quad (4)$$

onde,

EI_{30} = média mensal do índice de erosividade [(MJ.mm)/(ha.h)];

r = média do total mensal de precipitação [mm];

P = média do total anual de precipitação [mm]

Posteriormente, para determinação do fator R a ser utilizado para cada estação pluviométrica, soma-se os valores mensais do índice de erosividade encontrados pela equação 4 de acordo com a equação 5 a seguir.

$$R = \sum_{j=1}^{12} EI_{30j} \quad (5)$$

Onde o valor de j irá variar de 1, janeiro, até 12, dezembro, para cada estação.

3.8.1.2 Fator de Erodibilidade do Solo (K)

O fator de erodibilidade do solo denota a relação entre a perda de solo e a erosividade da chuva, sendo este inversamente proporcional à permeabilidade do solo, velocidade de infiltração da água no solo e a capacidade do solo em armazenar água (Bertoni & Lombardi Neto, 1990). Não obstante, por se tratar de um fator diretamente vinculado ao solo, vincula-se os dados da literatura sobre os valores de erodibilidade de acordo com as características de cada solo a partir do mapa de pedologia.

A seguir serão expostos os valores coletados na literatura para vinculação das classes de solos com o fator de erodibilidade do solo na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores de erodibilidade (fator K).

CLASSES	ASSOCIAÇÃO	FATOR K (t.h/MJ.mm)	FONTE
LATOSSOLO VERMELHO	LEd5	0,014	BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990
LATOSSOLO VERMELHO AMARELO	LEVd2	0,024	BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990
CAMBISSOLO HAPLICO	Cd3	0,05	BERTONI e LOMBARDI NETO, 1990
GLEISSOLO HAPLICO	Gx	0,035	Reatto et al., 2000
NEOSSOLO QUARTZARENICO	RQ	0,189	Castro, Selma; Hernani, Luis (2015)
NITOSSOLO VERMELHO	NV	0,029	Correchel, 2003.
PLINTOSSO PÉTRICO	FF	0,044	Carneiro, 2019.

Segunda a Tabela 3 supramencionada, estes são os valores que foram utilizados na elaboração do mapa do fator K, para representar a erodibilidade do solo.

3.8.1.3 Fator Topográfico (LS)

O fator topográfico dentro dos processos erosivos corrobora diretamente no aumento ou diminuição da velocidade e volume do escoamento superficial, assim como na capacidade de armazenamento da água, pois relacionam o comprimento de rampa e a declividade do terreno. Para o cálculo do fator LS, foi utilizado a metodologia de Moore & Burch (1986) representada pela equação 6 a seguir.

$$LS = \left(\frac{FA \cdot CellSize}{22,13} \right)^{0,4} \cdot \left(\frac{Sen(Slope)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (6)$$

Onde,

LS = fator topográfico

FA = fluxo acumulado de determinada área de contribuição;

CellSize = tamanho da célula do modelo numérico de terreno (MNT) usado no cálculo do FA;

Slope = declividade calculada para cada pixel em radianos.

3.8.1.4 Fator de Uso e Manejo do Solo (C) e de Práticas Conservacionistas (P)

O fator de uso e manejo de solo representa a relação entre o manejo do solo em uma determinada área e a ocorrência dessas em uma região com a presença de solos descobertos ou desprovidos de uma camada vegetal de proteção. Este fator é influenciado por diversas variáveis, dentre elas estão: o manejo de plantas presentes na cobertura vegetal, a quantidade de resíduos culturais na superfície, o manejo de cobertura da vegetação para proteção, o tipo de preparo e o tipo de vegetação presente (Wischmeier e Smith, 1978).

O fator de práticas conservacionistas está relacionado com as perdas de solo decorrentes das práticas que colaboram para que o terreno não tenha prejuízo quanto aos processos erosivos. Dentre as práticas, podem ser citadas o plantio que contenha a velocidade do escoamento superficial, plantio em contornos, cordões de vegetação permanente, plantio de morro em níveis mais baixos para conter a velocidade do escoamento (Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

Nesse sentido, são levantados na literatura de Almeida *et al.* (2012) alguns valores de C e P que serão norteadores para o presente projeto, presentes na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de referência para os fatores C e P.

Classes	Referência	Fator C	Fator P	Unidade Dimensional
Area agrícola	adaptado de ALMEIDA et al. 2012	0,14	0,12	Adimensional
Area rural	adaptado de ALMEIDA et al. 2012	0,05	0,06	Adimensional
Area urbana	adaptado de ALMEIDA et al. 2012	0	0	Adimensional
Cerrado	adaptado de ALMEIDA et al. 2012	0,02	0,025	Adimensional
Mata galeria	adaptado de ALMEIDA et al. 2012	0,02	0,025	Adimensional
Pastagem	adaptado de ALMEIDA et al. 2012	0,065	0,07	Adimensional

Dessa forma, conforme a Tabela 4 apresentada anteriormente, estes foram os valores encontrados na literatura de Almeida et al. (2012) que subsidiaram a representação do fator C e P, para caracterizar o uso e manejo do solo, assim como o de práticas conservacionistas.

3.9 MODELO QUALITATIVO FUNDAMENTADO EM GEOINDICADORES PARA AVALIAÇÃO DA EROSÃO LINEAR

Na avaliação do processo erosivo na região de estudo foi utilizado a metodologia proposta por Campagnoli (2002), cuja etapas estão descritas na Figura 10. A metodologia para análise dos processos erosivos lineares considera fatores pedológicos, geológicos e topográficos, que são características do terreno influenciadores nos processos erosivos que, por ventura, podem colaborar para o aparecimento de ravinas e até voçorocas modificando o terreno e ampliando as áreas de riscos.

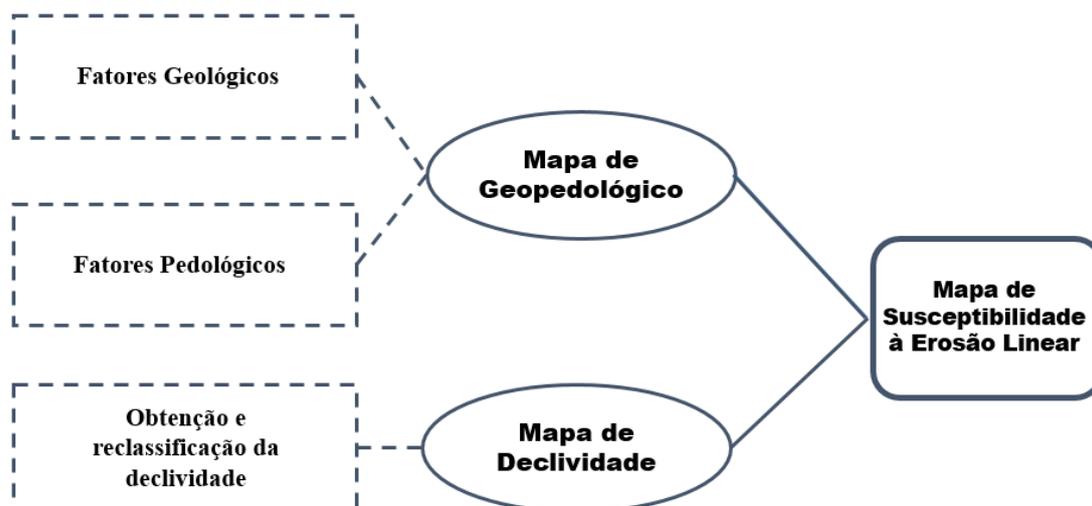


Figura 10 - Metodologia para geração do mapa de suscetibilidade à erosão linear

Fonte: Adaptado de Campagnoli (2002)

Na etapa 1, os valores que norteiam a suscetibilidade do alto ou baixo potencial erosivo linear são os valores de I a V, tanto de pedagogia quanto da geologia, descritos pelas Tabelas 5 e 6, onde V e IV são valores de alto potencial erosivo e I para baixos potenciais erosivos, com o respaldo de que a geologia tem como valor máximo de V, enquanto a pedagogia tem como IV.

Tabela 5 - Valores de vulnerabilidade da geologia.

Tipos de rochas	Valores de vulnerabilidade de rochas	Fonte
Ardósias	3	Crepani et al.,2001
Metarritmitos Arenoso	3	Sena, 2019

Tabela 6 - Valores de vulnerabilidade da pedagogia.

Tipos de solos	Valores de vulnerabilidade de Solos	Fonte
Cambissolo	3	Crepani et al.,2001
Gleissolo	4	Crepani et al.,2001
Latossolo Vermelho	1	Crepani et al.,2001
Latossolo Vermelho Amarelo	1	Crepani et al.,2001
Neossolo	3	Crepani et al.,2001
Nitossolo Vermelho	3	Gomes, Spadotto e Pessoa, 2002
Plintossolo	4	Crepani et al.,2001

Nas unidades pedológicas, constata-se que, com base em sua espessura e textura, os solos mais rasos apresentam baixo potencial erosivo linear, pois o substrato rochoso está mais próximo à superfície, o qual evita o desenvolvimento mais profundo de processos erosivos. Em contrapartida, as unidades geológicas baseiam-se nas características litológicas e estruturas rochosas para a classificação do potencial erosivo, em que quanto maior a permeabilidade e o volume de vazios nos litólicos, maior o potencial erosivo, pois indica que terá uma maior chance de desagregação e condução de compostos entre os espaços vazios.

Posteriormente, como etapa 1, cruzam-se os valores de potencial erosivo para as unidades de pedologia e geologia com base na Tabela 7 adaptada de Campagnoli (2002), obtendo um único mapa geopedológico.

Tabela 7 - Atributos de referência no cruzamento do mapa de geopedologia. (Adaptado de Campagnoli, 2002)

		Classes Geológicas				
		I	II	III	IV	V
Classes Pedológicas	I	I	I	I	II	III
	II	I	II	II	II	III
	III	I	II	III	III	III
	IV	II	III	III	IV	IV

Na etapa 2, reclassifica-se os valores de declividades obtidos a partir da topografia do terreno conforme a Tabela 8, cruzando matricialmente as unidades geopedológicas com a declividade reclassificada, com base na referência da Tabela 9 exposta.

Tabela 8 - Valores de referência da vulnerabilidade da declividade.

Declividade (%)	Valores de vulnerabilidade de declividade	Fonte
0 - 6	1	Modificado - Campagnoli, 2002
6 - 12	2	Modificado - Campagnoli, 2002
12 - 20	3	Modificado - Campagnoli, 2002
> 20	4	Modificado - Campagnoli, 2002

Tabela 9 - Atributos de referência no cruzamento do mapa de geopedologia com o de declividade (Adaptado de Campagnoli, 2002).

		Declividade (%)			
		I (0 a 6)	II (6 a 12)	III (12 a 20)	IV (>20)
Unidades geopedológicas	I	I	II	II	II
	II	I	II	III	III
	III	II	II	III	IV
	IV	III	III	III	IV

Portanto, foram estes valores contidos no cruzamento matricial de dois fatores das Tabelas 7 e 9, que permitiram elaborar o mapa final de suscetibilidade a erosão linear a partir dos geoindicadores.

3.10 ZONEAMENTO AMBIENTAL

O Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) ou também conhecido como zoneamento ambiental foi instituído no Brasil pelo Decreto 4.297/2002, tendo como objetivo principal compatibilizar o desenvolvimento socioeconômico com a conservação ambiental, viabilizando um desenvolvimento sustentável e eficiente de ocupação urbana a partir do estabelecimento de critérios para o Zoneamento Ecológico Econômico do Brasil.

Dentre os objetivos legais previsto no Decreto 4.297/2002, o Art. 3º comenta que: “tem por objetivo geral organizar, de forma vinculada, as decisões dos agentes públicos e privados quanto a planos, programas, projetos e atividades que, direta ou indiretamente, utilizem recursos naturais, assegurando a plena manutenção do capital e dos serviços ambientais dos ecossistemas.”

Além disso, para o Distrito Federal, tem-se a Lei 6269 de 29 de janeiro de 2019, que institui o ZEE no DF como um instrumento estratégico no planejamento e gestão territorial que visam também o desenvolvimento socioeconômico sustentável e a melhoria da qualidade de vida da população.

A vista disso, é possível notar que a regulamentação do zoneamento ambiental é uma ferramenta importante de gestão no gerenciamento do espaço e de sua ocupação correta e sustentável, permitindo um desenvolvimento seguro e que garanta a convivência da fauna, flora e do uso antrópico com os direitos básicos de saneamento, quando há um planejamento estratégico espacial eficiente. Dessa maneira, o presente projeto final de análise da área de estudo com a modelagem de vulnerabilidade ambiental torna-se um elemento auxiliar, quando compatibilizado ao zoneamento ambiental, no gerenciamento e gestão da área de estudo que delimitam a região disposta neste trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item é abordado todos os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho de projeto final e o fluxograma de toda a metodologia que se baseou para as análises de vulnerabilidade ambiental, indicadores geomorfológicos, suscetibilidade a erosão linear, a erosão laminar, a inundação e as ações antrópicas.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Softwares

No decorrer do desenvolvimento do presente projeto foram utilizados softwares de Sistema de Informações geográficas (SIG): ArcGis Pro, Spring 5.4.3 e o Google Earth, para armazenamento, manipulação algébrica, operações matriciais e sobreposições de bases de dados, com o objetivo de gerar os mapas de suscetibilidade à erosão linear, à erosão laminar, às ações antrópicas, à inundação e, por fim, o mapa de vulnerabilidade ambiental.

4.1.2 Imagens

As imagens digitais são dos satélites LANDSAT 5 para o ano de 1984 e 2000 e LANDSAT 8 para o ano de 2019, obtidas no banco de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em meses da estação seca da área de estudo.

4.1.3 Bases cartográficas

Para o estudo de vulnerabilidade ambiental foram necessários os mapas de pedologia, disponíveis pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA) na escala de 1:100.000; de geologia, disponíveis pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) na escala de 1:250.000; de Risco de Perda de Solo por Erosão disponível no Sistema Distrital de Informações Ambientais (SISDIA) e, por último, bases temáticas auxiliares como: hidrografia, limites do Distrito Federal (DF) e das Regiões Administrativas (RA), assim como o relevo obtido por curvas de nível espaçadas de 5 metros o que permite a produção do Modelo Digital de Elevação (MDE) e a sua declividade, o qual é disponibilizada pela Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação em sua plataforma do GeoPortal do DF.

4.1.4 Dados Pluviométricos e Fluviométricos

Para os dados de Pluviometria e Fluviometria, de frequência e intensidade, foi utilizado o Portal Hidroweb como fonte de base de dados, que é um banco de dados com as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade de águas e sedimentos, entre outros.

4.2 MÉTODOS

A metodologia aplicada no estudo de vulnerabilidade ambiental foi dividida em seis etapas.

1. Cálculo de indicadores geomorfológicos para análise inicial da área de estudo;
2. Obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 1984, 2000 e 2019 para avaliação do comportamento urbanístico e agrícola decorridos ao longo do tempo;
3. Produção dos mapas de erosão laminar com a Equação Universal de Perda do Solo, e o mapa de erosão linear, a partir da pedologia, geologia e declividade;
4. Produção do mapa de suscetibilidade à inundação com utilização da Análise Hierárquica de Processos com os parâmetros de hipsometria, declividade e uso e ocupação do solo.
5. Produção do mapa de vulnerabilidade ambiental a partir da sobreposição das camadas de erosão laminar (EUPS), erosão linear (Geoindicadores), suscetibilidade às ações antrópicas (uso e cobertura do solo para diferentes anos) e à inundação por meio da metodologia de AHP, visualizado pelo fluxograma metodológico da Figura 11.
6. Análise comparativa do mapa de vulnerabilidade ambiental e as referidas camadas compositoras de erosão laminar, linear, inundação e ações antrópicas com os pontos de rompimento de talude e de inundação.

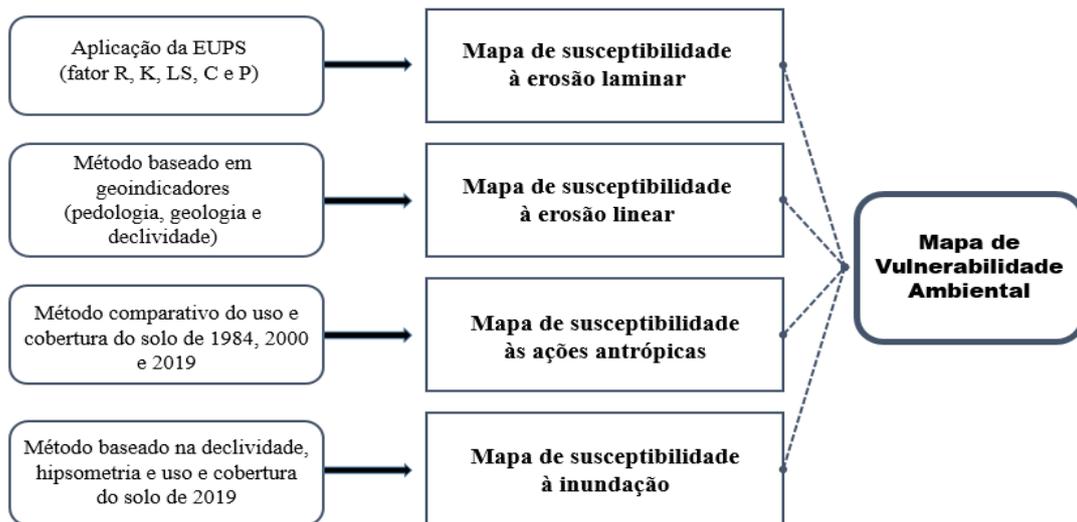


Figura 11 - Metodologia para produção do mapa de vulnerabilidade ambiental (adaptado de Almeida *et al.*, 2012)

4.2.1 Indicadores Geomorfológicos

O índice de Densidade de drenagem, dado pela relação entre o comprimento dos canais de uma bacia e sua área, e o índice de Gradiente de canais, dado pela relação entre a amplitude altimétrica das contas à montante e à jusante do canal e o comprimento do canal principal (Almeida *et al.*, 2013), foi calculado com o auxílio das ferramentas Arcgis Pro a partir da criação do shapefiles em linhas e consulta na tabela de atributos, e o Google Earth Pro com a função do perfil de elevação para consulta a uma curva de nível sobre um determinado traçado, com base nas equações 7 e 8 exposta a seguir:

$$Dd = \frac{(\sum L)}{A} \quad (7)$$

Onde,

$\sum L$ = Somatório total de cursos d'água;

A = Área da bacia hidrográfica

$$Gd = \frac{(Cnas - Cexu)}{L} \quad (8)$$

Onde,

Cnas = Conta altimétrica da nascente da bacia hidrográfica;

Cexu = Conta altimétrica do exultório da bacia hidrográfica

4.2.2 Mapas de Uso e Cobertura do Solo

O mapa temático de uso e cobertura do solo foi elaborado para os anos de 1984, 2000 e 2019, dos meses da estação de seca em junho/julho, onde as imagens utilizadas foram obtidas no banco de dados do INPE, em que se manipulou algoritmos de processamento de imagens no software SPRING e editou-se as feições com o software ArcGis Pro com base na metodologia dos autores Almeida *et al.* (2012), descritas consecutivamente a seguir.

- Registro de imagens: nesta etapa, coleta-se as imagens da base de dados do INPE, georreferencia-se inserindo pontos de controle com coordenadas de latitude e longitude, subsidiando-os como pontos de referência para que a imagem processe as correções geográfica e entenda o seu contexto frente ao plano de informação geográfica. Para isso, utilizou-se do software Google Earth, como ferramenta auxiliar, na análise comparativa desses pontos de controle, eliminando distorções nas imagens que podem ter sido causadas pelo sensor, imprecisão ou posicionamento da plataforma.
- Realce de contraste: a técnica de realce do contraste tem como objetivo melhorar a qualidade das imagens sob os critérios subjetivos aos olhos humanos, como uma etapa de pré-processamento para os sistemas de reconhecimentos de padrões. Visto isso, modifica-se a reta do histograma, que descreve a distribuição estatística dos níveis de cinza dos pixels, a fim de garantir maior contraste na diferenciação dos objetos existentes.
- Imagem Índice de Vegetação Normalizada (IDVN): é uma imagem obtido pela operação aritmética conforme a equação 9, utilizando as bandas espectrais do vermelho e infravermelho próximo, resultando em uma melhor diferenciação entre o solo e a vegetação;

$$IVDN = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (9)$$

onde,

IR = banda infravermelho próxima do espectro eletromagnético

R = banda vermelha do espectro eletromagnético

- Análise de componentes principais: a geração das componentes principais é uma técnica de realce que reduz ou remove esta redundância espectral. Tais redundâncias são muitas vezes causadas pelos efeitos de sombras resultantes da topografia, sobreposição das janelas espectrais ou o próprio comportamento espectral dos

objetos. Por conseguinte, as imagens são obtidas pelo algoritmo de análise de componentes principais, tendo como elemento de saída as bandas espectrais, cuja as três primeiras bandas representam mais de 80% das informações espectrais das bandas originais.

- Segmentação da imagem: para a segmentação das imagens que foram treinadas e classificadas posteriormente, processou-se as três primeiras imagens de componentes principais, de IDVN e as imagens realçadas, realizando uma iteração entre os parâmetros de área de pixel e similaridade com o intuito de se chegar em uma boa segmentação que cubra as áreas homogêneas que foram treinadas segundo sua classificação de uso e cobertura.
- Classificação temática das imagens: na classificação temática das imagens, processou-se as três primeiras bandas de componentes principais, a imagem IDVN e a imagem segmentada. Em seguida, com o algoritmo do software, fez-se o treinamento das regiões segmentadas com a técnica de classificação por regiões do classificador Bhattacharya, cuja classes temáticas de uso e cobertura do solo foram agrupadas em: área agrícola, área rural, área urbana, cerrado, mata galeria, pastagem, rio, silvicultura e solo exposto. Sendo assim, a classificação por regiões consiste na correspondência das feições de polígonos com uma determinada categoria temática compatível.
- Vetorização/edição das imagens: as imagens temáticas resultantes do processo de classificação foram vetorizadas, sendo associadas a um respectivo polígono e importadas do software SPRING para o ArcGis, para que se corrigisse polígonos da imagem temática de uso e cobertura do solo que não estivessem em concordância com a situação real da área do terreno. Por isso, nesta etapa de correção, usou-se o Google Earth como ferramenta de identificação de alvos para a correta classificação de cada polígono.

4.2.3 Mapa de Suscetibilidade à Erosão Laminar

O mapa de suscetibilidade à erosão laminar tem como embasamento teórico o item 3.8 deste presente projeto final, que se baseia na Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) para ter como um indicador do processo de erosão laminar. Para tanto, este equacionamento tem como dados de entrada: o fator de erosividade da chuva (R), fator erodibilidade do solo (K),

fator topográfico (LS), fator de uso e manejo do solo (C) e o fator de práticas conservacionistas (P).

No fator de erosividade da chuva, que expressa o potencial das águas pluviais em desagregar e transportar o solo por meio do escoamento superficial (Almeida *et al.*, 2017), foi calculado, primeiramente, a somatória da média mensal do índice de erosividade para os meses dos anos correlatos a cada estação. Em seguida, com o método de krigagem, que é a interpolação por geoestatística, executa-se a função “Kriging” no Arcgis, gerando a imagem do fator R.

No fator de erodibilidade do solo, que representa a relação entre a perda do solo e a erosividade da chuva, foi utilizado o mapa pedológico do DF, atribuindo-se valores às feições de solo a partir das características intrínsecas dentro da área de estudo. Assim sendo, cria-se uma coluna dentro da tabela de atributos no software Arcgis inserindo valores de erodibilidade a cada tipologia de solo.

No fator topográfico, construído pela integração do comprimento de rampa e da declividade, calcula-se o fluxo acumulado, com a função *flow direction* e, posteriormente, o *flow accumulation*; e a declividade, com a função *Slope*, tendo como dado de entrada o Modelo Digital de Elevação (MDE), aplicando-se a equação 6 com a função *raster calculator*, obtendo o mapa do fator K.

No fator de uso e manejo do solo e práticas conservacionistas, atribui-se valores para cada classe temática de uso e cobertura do solo, segundo as características de manipulação e conservação do solo, com a criação de uma coluna na tabela de atributos, auxiliado pelo uso do Google Earth na identificação das classes temáticas.

Por fim, multiplicam-se todos os fatores supramencionados (R, K, LS, C e P) com o auxílio da função “*Raster Calculator*” do Arcgis, resultando no mapa de erosão laminar.

4.2.4 Mapas de Suscetibilidade à Erosão Linear

Para a obtenção do mapa de suscetibilidade à erosão linear, segundo a proposta de Campagnoli (2002), são necessárias quatro etapas. A primeira consiste na reclassificação do mapa pedológico e geológico com valores de I a V, baseando-se em suas características de textura e espessuras das camadas de solos no mapa pedológico e, para o mapa geológico, nas características de suscetibilidade à erosão e intemperismo sofridos pelas diversas rochas, cujo os valores classificados como I representam uma baixa suscetibilidade a erosão e IV e V como a mais alta suscetibilidade à erosão.

Na etapa dois, busca-se realizar o cruzamento de ambos os mapas supramencionados (mapa pedológico e geológicos já reclassificados) de acordo com a Figura 7 apresentadas no item 3.9 deste estudo, com a intenção de obter um único mapa de geopedologia para ser cruzado posteriormente com o mapa de declividade.

Na etapa três é realizado a reclassificação do mapa de declividade, seguindo a mesma lógica da reclassificação dos mapas de pedologia e geologia, ou seja, de acordo com o intervalo de declividade, atribuindo-se valores de I a IV para cada intervalo, sendo I para uma menor suscetibilidade à erosão e IV para a maior suscetibilidade.

Por fim, como etapa quatro, é executado o cruzamento do mapa de geopedologia e de declividade reclassificado segundo a Tabela 9 do item 3.9, obtendo como produto o mapa de suscetibilidade a erosão linear. Não obstante, é interessante comentar que as reclassificações dos mapas foram realizadas na tabela de atributos com a função *reclassify* e o cruzamento com a função *Raster Calculator*, ambos dentro do software ArcGis.

4.2.5 Mapas de Suscetibilidade à Inundação

Para este mapa de suscetibilidade à inundação (Nogueira, 2017), utilizou-se da metodologia AHP proposta por Saaty (1980), na qual foi realizada uma análise comparativa dos fatores de hipsometria, declividade e uso e cobertura do solo, atribuindo valores de relevância mais alta para os fatores que tiverem mais influência em zonas mais propícias a serem inundadas. A posterior, com o auxílio da ferramenta *Reclassify* e *Raster Calculator* no Arcgis foi elaborado o mapa de suscetibilidade à inundação a partir dos valores de pesos advindos da metodologia AHP.

4.2.6 Mapas de Suscetibilidade às Ações Antrópicas

O mapa de suscetibilidade às ações antrópicas consiste na atribuição de diferentes graus de vulnerabilidade à erosão em diferentes anos (1984, 2000 e 2019), com relação às classes temáticas antropizadas do mapa de uso e cobertura do solo (urbano, agrícola e rural antropizado). Na associação aos graus de vulnerabilidade é atribuído maior peso à classe urbana e aos anos mais recentes, tendo em vista que a urbanização é a principal colaboradora, dentre as classes temáticas, para o fenômeno de erosão e aumento do escoamento superficial, além disso, para os anos mais recentes presume-se que são áreas menos consolidadas e mais suscetíveis a sofrer processos erosivos. Por outro lado, atribuiu-se valores menores às classes temáticas de áreas rurais e agrícolas devido ao menor grau de alteração e mudança com relação ao ambiente natural, conforme a Tabela 10. No mais, este estudo, na classificação

temática de uso e cobertura do solo diferenciou o rural e o agrícola com a ressalta de que: rural é o local de campo com a ocupação antrópica sem cultivo de nenhuma cultura e a agrícola é o local de campo com o cultivo de alguma cultura.

Tabela 10 - Graus de vulnerabilidade das classes antrópicas do uso e cobertura do solo.

	CATEGORIAS	
ANOS	Urbano	Rural/Agrícola
2019	5	4
2000	3	2
1984	2	1

Com isso, ao final do processo, utilizou-se as ferramentas *erase*, *clip* e *merge* no ambiente do Arcgis, com a finalidade de não haver sobreposição de camadas e, assim, a atribuição correta dos valores de vulnerabilidade correspondentes aos impactos evolutivos no decorrer dos anos, gerando assim ao final do processo o mapa de suscetibilidade às ações antrópicas.

4.2.7 Mapas de Vulnerabilidade Ambiental

Finalmente, como produto fim do auxílio na tomada de decisão na gestão ambiental territorial, foi produzido o mapa de vulnerabilidade ambiental com base na Análise Hierárquica de Processos (AHP), vinculando pesos de relevância para cada um dos mapas propostos anteriormente de: suscetibilidade à erosão laminar, à erosão linear, à inundação e às ações antrópicas, obtidos por algoritmo de álgebra de mapas a partir da equação resultante da AHP para os mapas de suscetibilidades citados anteriormente. A álgebra de mapas foi executada pela ferramenta *raster calculator* dentro do ambiente do software Arcgis.

Assim, realizou-se a reclassificação de cada camada componente parcial do mapa de vulnerabilidade para um intervalo de graus de vulnerabilidade de I a V, associando graus de importância para os diferentes fatores, rearranjando-se os fatores por meio da reclassificação final a partir da compatibilização em um produto fim denominado mapa de vulnerabilidade ambiental.

Dessa maneira, com o mapa de vulnerabilidade ambiental, possibilitou-se a análise de áreas sensíveis, as quais nortearão uma gestão espacial estratégica com mais propriedade, tendo em vista que a construção do citado mapa leva em conta diversos fatores ambientais. Além

disso, com os mapas de uso e cobertura do solo dos diferentes anos possibilitou avaliar a evolução urbana que ocorreu ao longo do tempo. Ademais, os diversos mapas de suscetibilidade que compõem o mapa final de vulnerabilidade ambiental possibilitaram análises parciais comparativas, que permitiram diversas constatações as quais podem ser visualizadas na etapa seguinte de resultados e discussão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 INDICADORES GEOMORFOLÓGICOS

Como etapa inicial de análise a partir das influências das características geomorfológicas, foram selecionados indicadores geomorfológicos constante no estudo de Almeida *et al.* (2013): o índice “Densidade de drenagem” (Dd) e o índice “Gradiente de canais” (Gc), para avaliar a fragilidade ambiental natural da subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo. O índice Densidade de drenagem (Dd) é dado pela relação entre comprimento dos canais de uma bacia e sua área e caracteriza-se por indicar, segundo Horton (1945), a permeabilidade e o condicionamento do escoamento superficial do comportamento hidrológico das rochas. Enquanto o índice Gradiente de canais é dado pela relação entre a amplitude altimétricas das cotas à montante e à jusante do canal e o comprimento do canal principal e a sua finalidade é, além de indicar a declividade do curso d’água, permitir inferências sobre a capacidade de provocar processos erosivos em seus canais.

A posterior, na Tabela 11 será mostrado os resultados calculados desses índices supramencionados.

Tabela 11 - Resultados dos índices de “Densidade de Drenagem” e “Gradiente de canais”.

	L (km)	A (km ²)	RESULTADO	unidade
Índice Densidade de drenagem	28,0	75,0	0,4	km/km ²

	L (km)	Htopo (m)	Hbaixo (m)	RESULTADO	unidade
Índice Gradiente de canais	9,9	1206,0	1018,0	1,9	%

Nos resultados encontrados, o índice final calculado de Densidade de drenagem foi de 0,4 km/km², em que, de acordo com Villela & Mattos (1975), os valores de Densidade de drenagem podem variar de 0,5 a 3,5 km/km², sendo que valores de Densidade de drenagem baixos apontam para uma alta infiltração e os valores altos indicam uma alta taxa de escoamento superficial. Portanto, nesta primeira análise, pode-se notar que a subunidade hidrográfica da bacia do Riacho Fundo aponta para uma alta taxa de infiltração e uma baixa taxa de escoamento superficial.

Sobre o índice de Gradiente de canais, foi calculado um valor final de 1,9%, em que, segundo o estudo de Almeida *et al.* (2013), as bacias hidrográficas que apresentaram valores próximos a esta subunidade hidrográfica caracterizavam-se pela menor capacidade de

transporte de sedimentos e, conseqüentemente, uma menor probabilidade de ocorrer processos erosivos decorridos do assoreamento de sedimentos.

Portanto, segundo as características naturais geomorfológicas, essa subunidade hidrográfica de estudo denota uma alta tendência a baixos escoamentos superficiais, alta infiltração, baixo processo de assoreamento e, conseqüentemente, baixos processos erosivos, o que certamente prediz afirmar que quaisquer aumentos de suscetibilidade a processos erosivos sejam decorrentes de alterações antrópicas no ambiente.

5.2 MAPAS TEMÁTICOS DE USO E COBERTURA DO SOLO

Na elaboração do mapa temático de uso e cobertura do solo foi utilizado como base os anos de 1984, 2000 e 2019 com o auxílio de imagens dos satélites Landsat 5, para os anos de 1984 e 2000, e Landsat 8, para o ano de 2019, possibilitando a diferenciação temática das classes de uso dos solos para avaliação da evolução urbana conforme os objetivos específicos explicitados no item 2.2. A metodologia empregada para obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo está explicitada no item 4.2.2

Dessa maneira, será apresentado a seguir os mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 1984, 2000 e 2019, e a tabela quantitativa das áreas dos devidos anos na Figura 12 e Tabela 12.

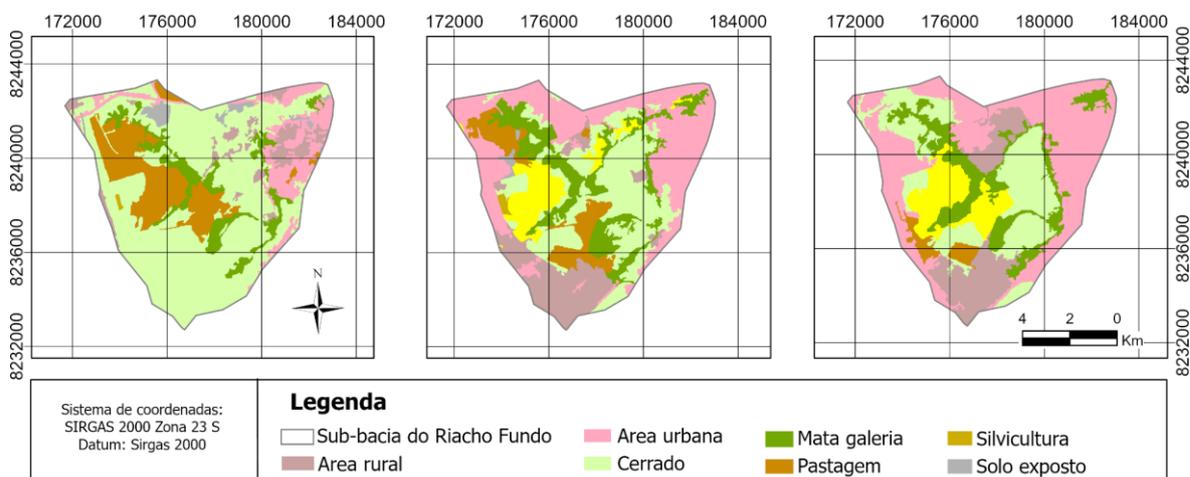


Figura 12 - Mapa de uso e cobertura do solo para os anos de 1984, 2000 e 2019.

Tabela 12 - Quantitativo de áreas em Km² do uso e cobertura do solo

Classes	Area em km ²		
	1984	2000	2019
Area agricola	0	5,9	7,4
Area rural	4,2	9,4	9,7
Area urbana	8,2	22,1	27,7
Cerrado	42,2	19,5	17,4
Mata galeria	6,5	11,1	10,4
Pastagem	11,8	6	2
Silvicultura	0,1	0,3	0
Solo exposto	1,6	0,4	0

Nos dados apresentados pela Tabela 12 é visto que houve um crescimento expressivo da área urbana desde o ano de 1984, crescendo em mais de 3 vezes em 2019 as áreas correspondentes com relação aos anos de 1984, além disso, a área agrícola teve um crescimento, mas de forma menos expressiva frente à área urbana. Por outro lado, o cerrado teve um decréscimo significativo desde o ano de 1984, diminuindo sua área em mais da metade da área correspondente ao ano de 1984, a mata galeria manteve-se aproximadamente constante desde o ano 2000 e a pastagem diminuiu sua área desde o ano 1984, provavelmente dando espaço para áreas rurais ou urbanas.

Esses fatores da crescente urbanização colaboram para o aumento de áreas impermeáveis, aumento do escoamento superficial no meio urbano e, conseqüentemente, aumento na probabilidade de processo erosivo. Somado a isso, a diminuição da área de cerrado e mata de galeria, favorece, também, a um cenário de menor taxa de infiltração de água no solo e redução na contenção de processo erosivos, contribuindo para o aumento do escoamento superficial e ao aumento de processo erosivos e de assoreamento. Além disso, é válido comentar que neste estudo realizou-se a diferenciação de áreas rurais e agrícolas como sendo: rural a área de campo de ocupação antrópica sem cultivo de culturas e a agrícola como a área de campo destinada ao cultivo de algum tipo de cultura.

Por isso, é de relevante importância a preservação de matas ciliares e do cerrado no planejamento urbano para possibilitar a infiltração da água no solo e contenção dos aportes

de sedimentos advindos dos escoamentos superficiais, como, também medidas estruturais de mitigação dos processos erosivos no controle da drenagem pluvial urbana.

Ademais, em análises posteriores, para obter mapas de uso e cobertura do solo mais representativos, é interessante que sejam utilizadas imagens com uma melhor resolução, como imagens de VANT, no intuito de melhorar a análise, tendo em vista que uma melhor resolução possibilita uma melhor distinção dos objetos contidos na imagem.

5.3 ÁREAS SUSCETÍVEIS À EROSÃO LAMINAR

O mapa de suscetibilidade à erosão laminar é expresso pela Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), na qual é composto pela integração de 5 fatores: fator de erosividade da chuva (R), fator de erodibilidade do solo (K), fator topográfico (LS), fator de uso e manejo do solo (C), e fator de práticas conservacionistas (P). A metodologia empregada para obtenção dos mapas supramencionados está explicitada no item 4.2.3.

O mapa final utiliza da concatenação de todos esses fatores no ambiente SIG para indicar espacialmente os diferentes graus de potencialidade de erosão laminar. Dessa forma, serão apresentados os mapas dos fatores componentes da suscetibilidade ambiental e o mapa final de suscetibilidade à erosão, demonstrados pelas Figuras 13 e 14.

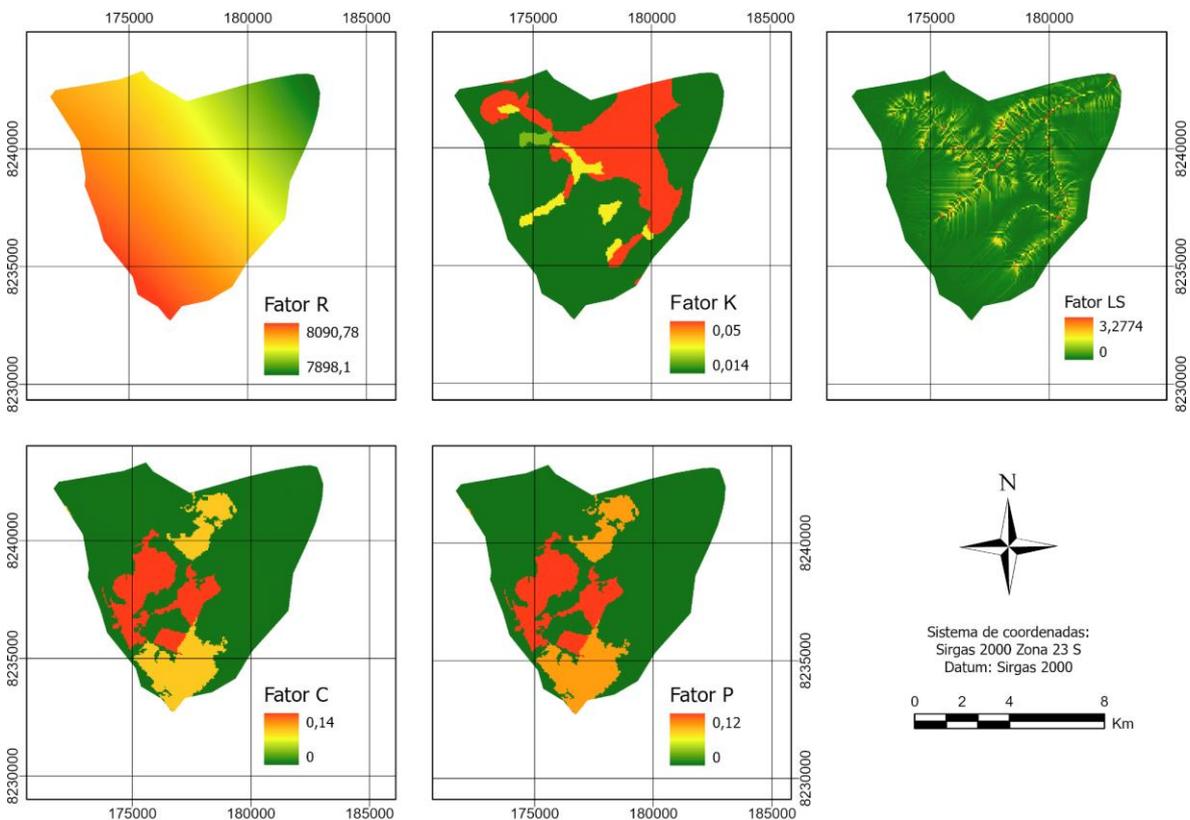


Figura 13 - Mapa dos fatores componentes da suscetibilidade à erosão laminar.

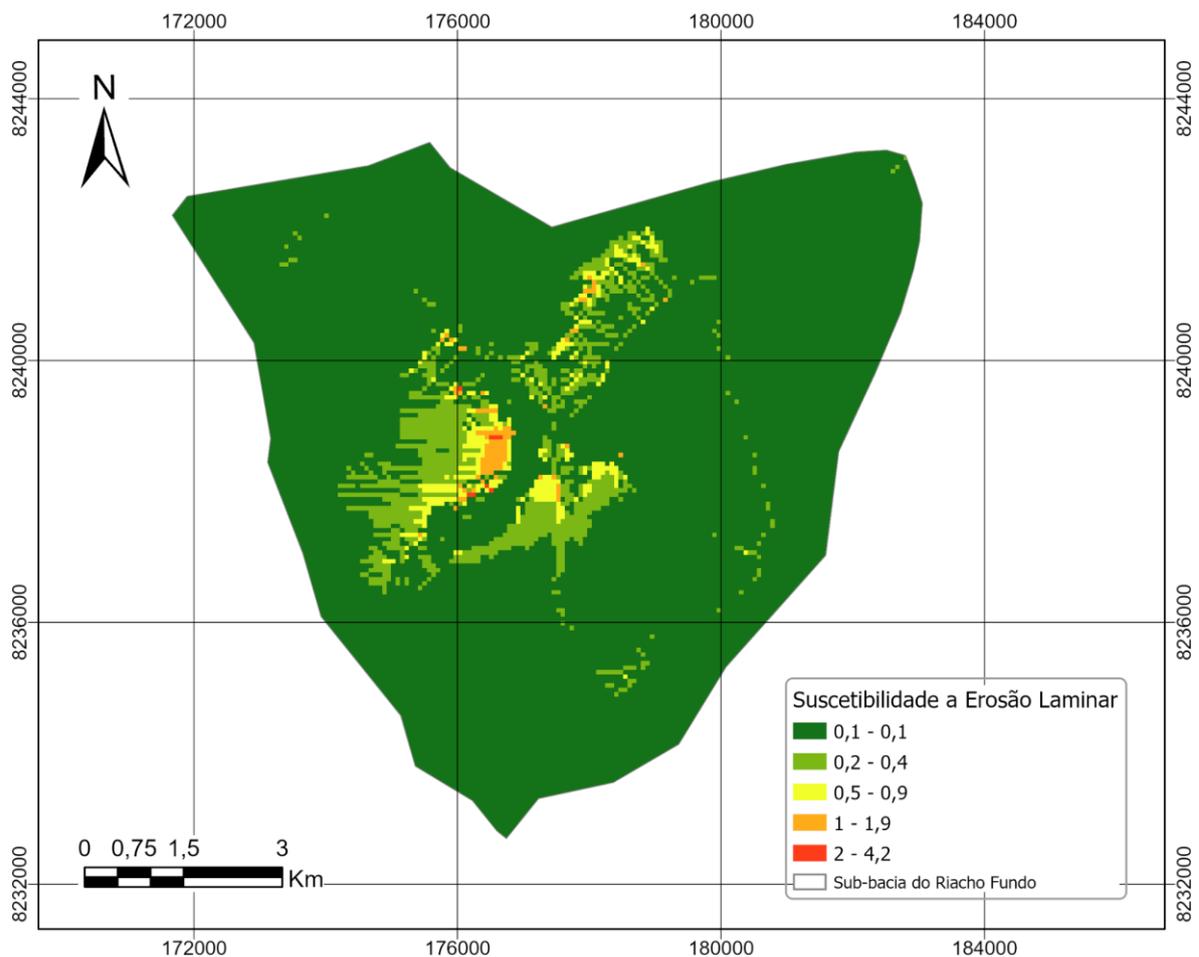


Figura 14 - Mapa de suscetibilidade à erosão laminar.

Como resultado, pode-se notar que grande parte da área é coberta por uma baixa suscetibilidade à erosão laminar, mas são marcadas por altas probabilidades de erosão laminar no centro da área de estudo devido às influências antrópicas das regiões agrícolas e urbanas.

No mais, é válido a observação sobre a EUPS, que o resultado encontrado neste estudo não deve ser considerado como um resultado absoluto, tendo em vista que não foi realizado trabalho de campo e no fator de erosividade da chuva houve poucas estações com uma série histórica de dados razoável.

5.4 ÁREA SUSCETÍVEIS À EROSÃO LINEAR

No mapeamento de áreas suscetíveis a processo de erosão linear concatenou-se 3 fatores: geologia, pedologia e declividade. Sendo, primeiramente, realizado o cruzamento matricial

da pedologia e da geologia, segundo a metodologia exposta no item 3.9, alcançando-se os resultados apresentados na Figura 16.

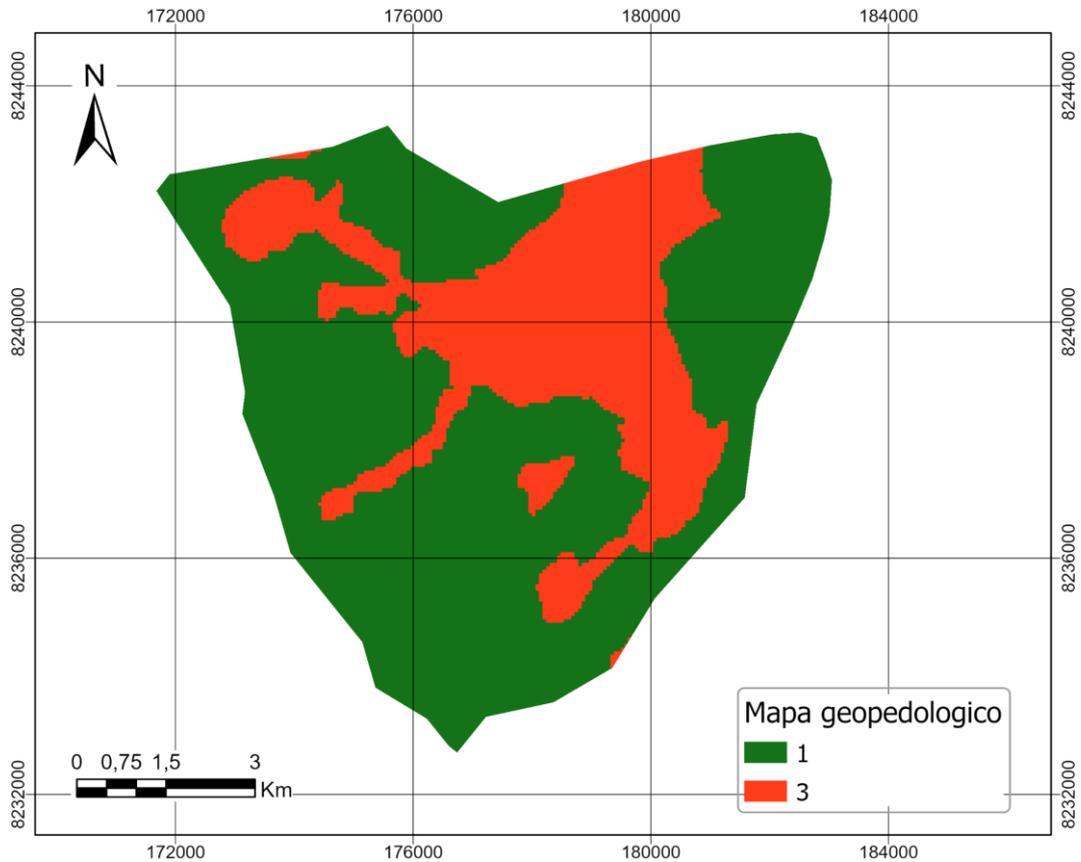


Figura 15 - Mapa Geopedológico da área de estudo.

Neste mapa exposto de geopedologia, pode-se notar que existem apenas dois graus de vulnerabilidade, isto se deve ao fato da área de estudo ser coberta por apenas uma camada de grau de vulnerabilidade quanto à geologia e três camadas de grau de vulnerabilidade quanto à pedologia, conforme a tabela dos diferentes graus de vulnerabilidade coletados na literatura.

Em continuidade, reclassificou-se a declividade em 4 graus de vulnerabilidade com base na tabela 13, chegando-se ao resultado do mapa de vulnerabilidade da declividade apresentado na Figura 16. A metodologia empregada para obtenção dos mapas de suscetibilidade a erosão linear está explicitada no item 4.2.4.

Tabela 13 - Graus de vulnerabilidade da declividade.

Graus de vulnerabilidade	Declividade(%)	Area (Km ²)
Muito Baixa	< 2	9,7
Baixa	2 - 5	41,4
Média	6 - 20	22,9
Alta	20 - 50	0,5

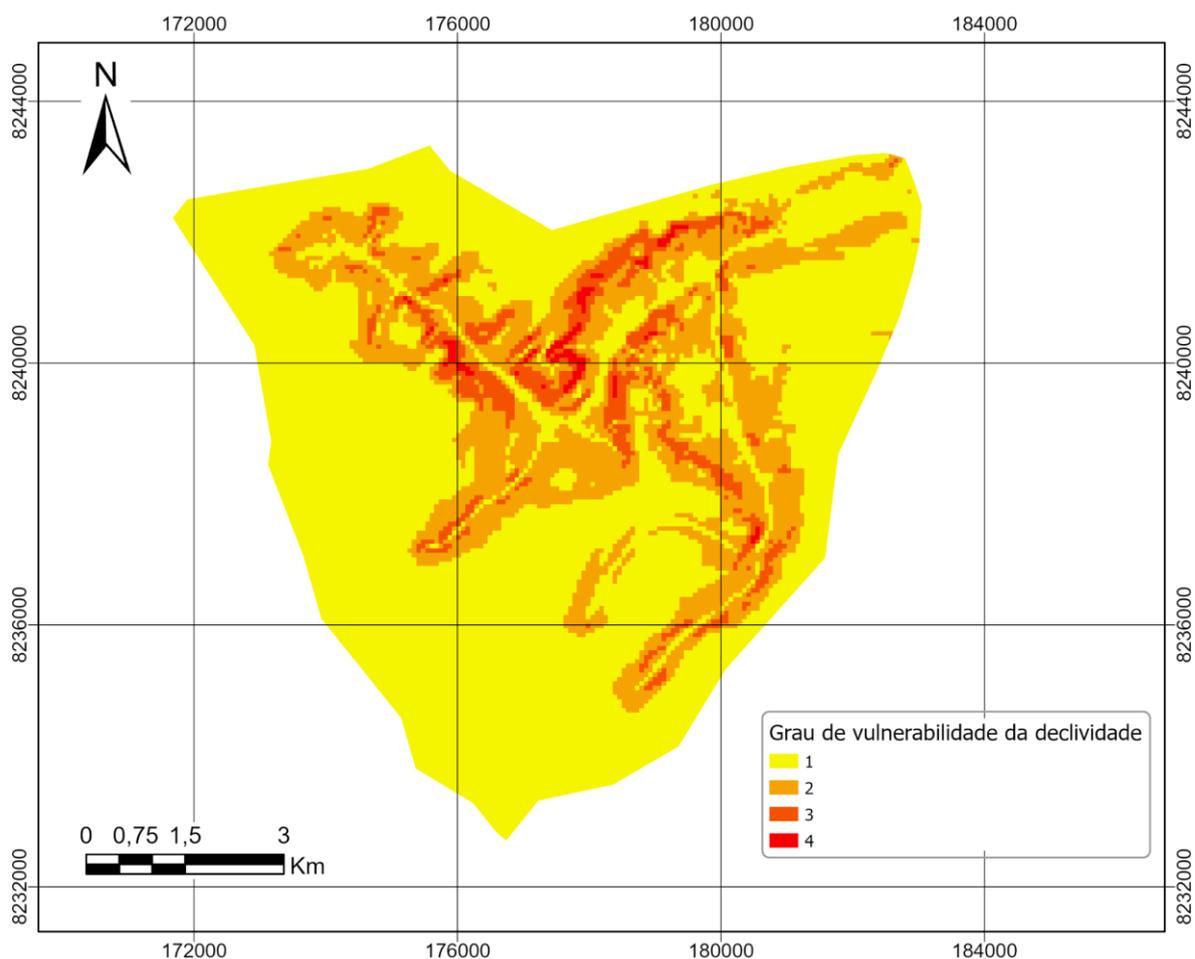


Figura 16 - Mapa de vulnerabilidade da declividade.

Neste mapa de declividade, nota-se que a área de estudo em sua maioria é coberta por uma declividade muito baixa ou baixa, enquanto as bordas dos corpos hídricos demonstram uma declividade majoritariamente média, marcado por eventos minimamente pontuais de vulnerabilidade alta.

Em seguida, com o intuito de elaborar o mapa de suscetibilidade à erosão linear, realizou-se o cruzamento matricial da declividade com a camada de geopedologia, conforme o método apresentado no item 3.9, chegando-se ao resultado final demonstrado pela Figura 17.

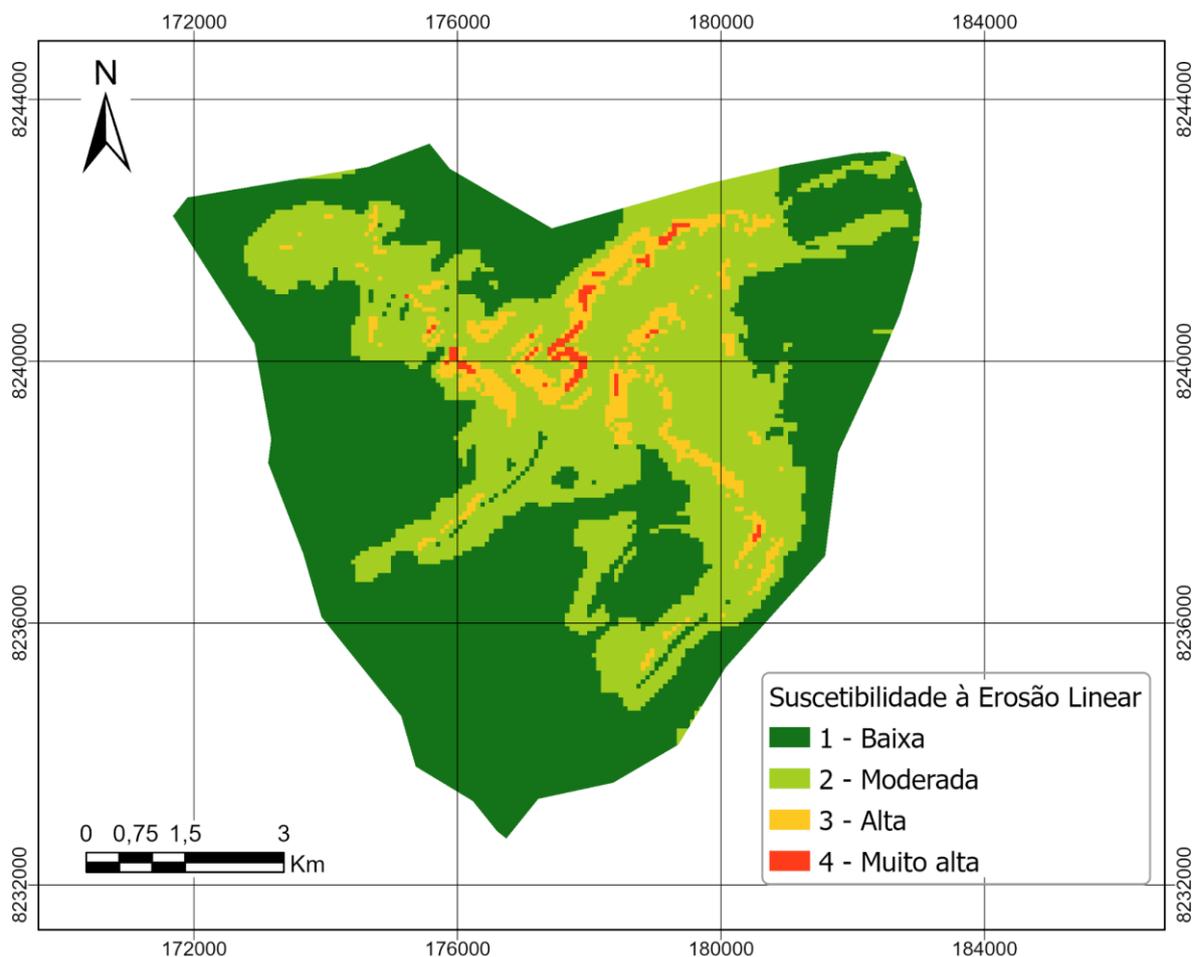


Figura 17 - Mapa de suscetibilidade à erosão linear.

Neste último mapa que demonstra a suscetibilidade da área de estudo a processo erosivos lineares, constatou-se que a camada de vulnerabilidade da declividade teve um grande peso no mapa final, em que pôde ser visto que o maior grau de vulnerabilidade está marcado em regiões de maior declividade e adjacentes ao corpo hídrico do Riacho Fundo. Desta forma, deve-se monitorar com maior cautela essas regiões com alta declividade, pois são áreas com maiores declividades que colaboram para aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, carreamento de sedimentos advindos do meio urbano, o que acaba acarretando em poluição e assoreamento dos ambientes aquáticos, o qual pode ser acentuado devido às regiões mais declivosas serem presentes próximas ao córrego do Riacho Fundo. No mais, a fim de acrescentar a análise de suscetibilidade à erosão linear buscou-se na base de dados do Sistema Distrital de Informações Ambientais (SISDIA) da Secretaria do Meio

Ambiente uma camada denominada de Risco de Solo por Erosão, que será apresentado à posterior pela Figura 18, o qual demonstra uma semelhança bem marcante com o mapa de geopedologia, considerando que a construção desta camada foi fundamentada na erodibilidade do solo. Portanto, foi visto que a elaboração do presente mapa de suscetibilidade à erosão linear considera mais fatores e, por isso, pode ser considerado mais representativo quando se fala de suscetibilidade à erosão linear, enquanto a camada do SISDIA denota uma erosão baseado nas características do solo, o qual não se apresenta com um fato negativo, pois dependerá do objetivo da análise estudada.

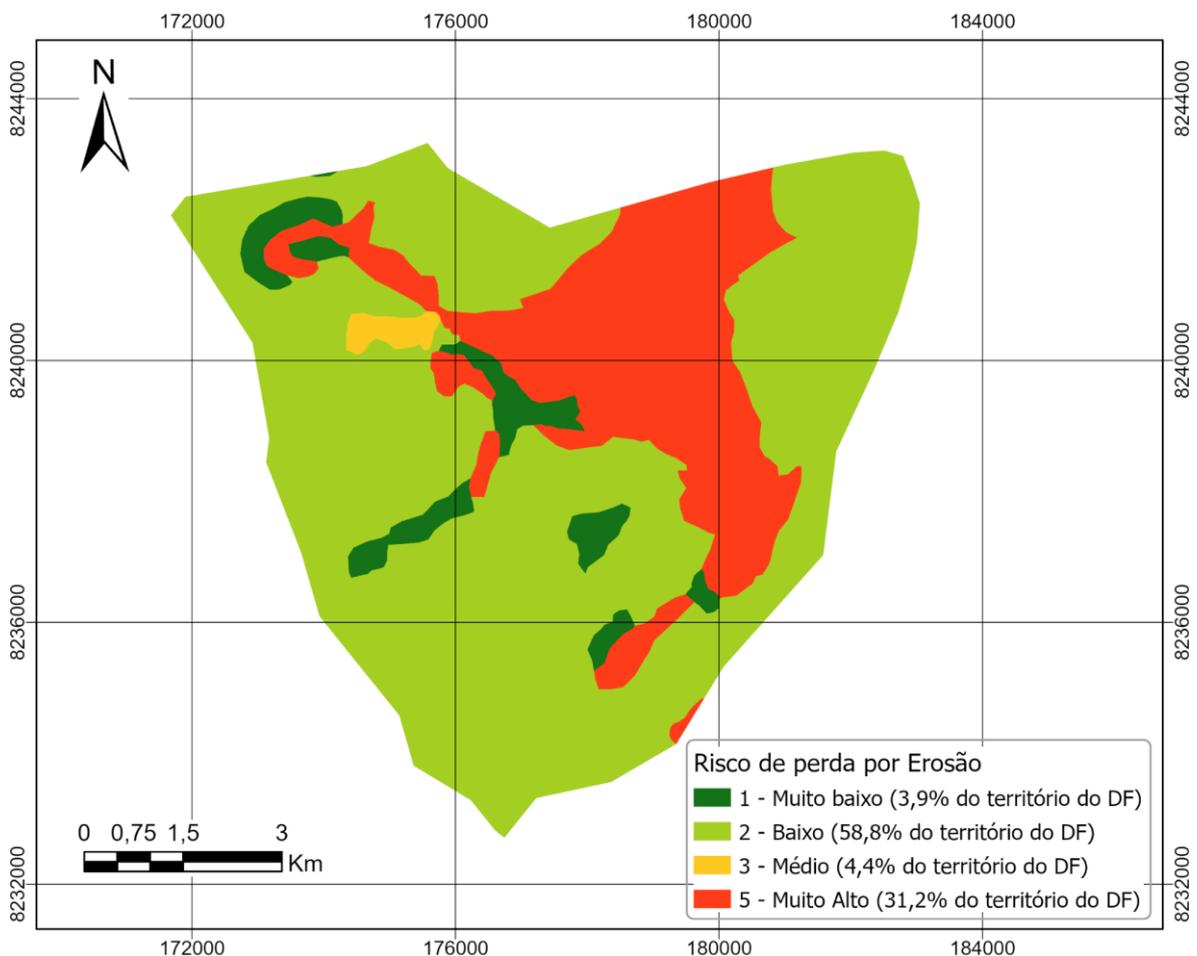


Figura 18 - Mapa de Risco de Perda de Solo por Erosão.

5.5 ÁREA SUSCETÍVEIS À INFLUÊNCIA ANTRÓPICA

O mapeamento de áreas suscetíveis à influência antrópica foi elaborado segundo a metodologia apresentada no item 4.2.6, em que regiões urbanizadas e agrícolas receberam valores de graus de vulnerabilidade conforme sua fragilidade. Portanto, foram atribuídos valores maiores para regiões mais urbanizadas e mais recentes, pois são regiões mais

modificadas e menos consolidadas. Dessa forma, a Figura 19 demonstra o grau de vulnerabilidade da suscetibilidade a ações antrópica na área de estudo.

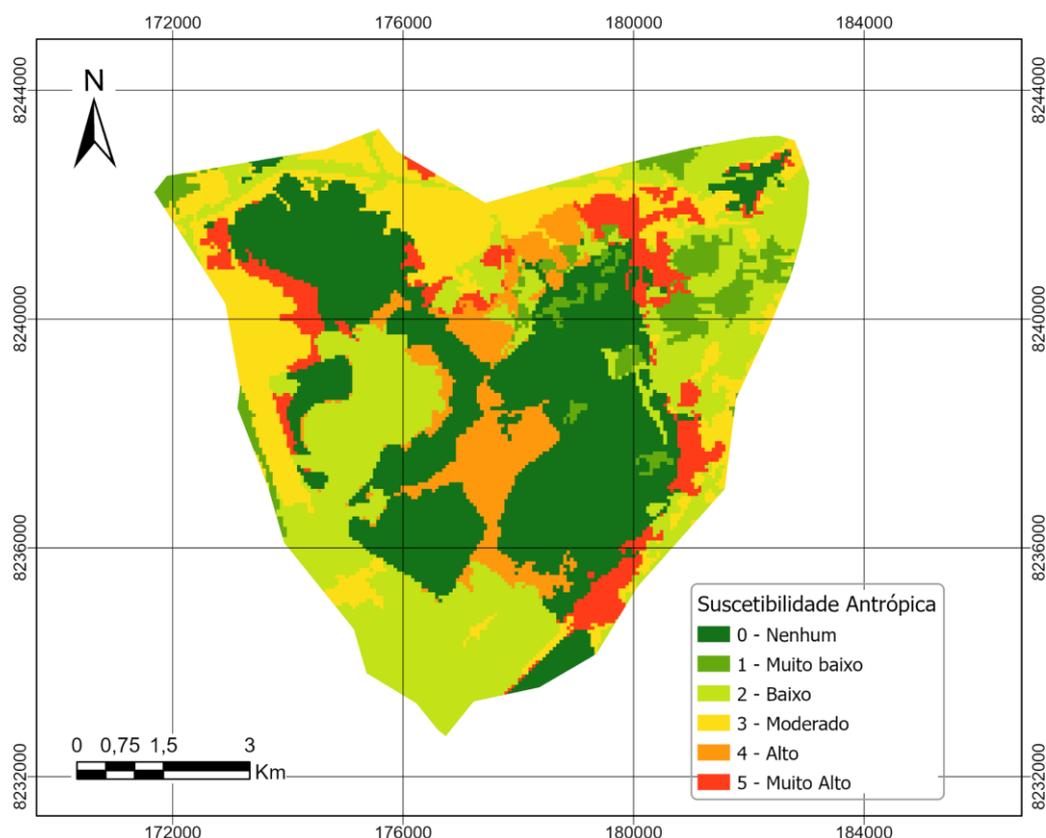


Figura 19 - Mapa de suscetibilidade às ações antrópicas.

Sendo assim, após os resultados da Figura 19, pôde-se notar que as áreas que apresentaram maiores graus de vulnerabilidade são regiões urbanizadas ou agrícolas e com aparições mais recentes como é o caso da crescente urbanização da Região Administrativa do Riacho Fundo 2. Ou seja, isso demonstra que o mapa apresentado pela Figura 19 realmente demonstra o que estava planejado para ser mostrado, que são regiões antropizadas e com um tempo de surgimento menor, reforçando sua coerência na análise.

5.6 ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO

O mapeamento das áreas suscetíveis à inundação foi baseado na metodologia proposta pelo item 4.2.5, tendo como fatores compositores da análise a declividade, a hipsometria e o uso e cobertura do solo. Nesta análise, adotou-se o método AHP proposto por Saaty (1987), resultando em uma normalização de autovetores, que indica os pesos de importâncias,

corresponde a: 10,62% para o fator de uso e cobertura do solo, 63,33% para a hipsometria e, 26% para a declividade.

Estes autovetores tornam-se viáveis, segundo a metodologia proposta por Saaty (1987), quando são coerentes à realidade da área de estudo e com Razão de Consistência (RC) menor do que 0,10. Portanto, para a análise deste estudo foi alcançado um valor de RC igual a 0,02 e baseou-se na comparação paritária os pontos de inundação já identificados e de rompimentos de taludes devido ao evento de forte chuva ocorrido em fevereiro de 2019, como será apresentado a seguir. Dessa forma, pode-se dizer que o estudo se mostrou viável e coerente, conforme a verificação do RC menor que 0,10.

Por fim, com os pesos de importância dos fatores verificados, concatenou-se os fatores de declividade, hipsometria e uso e cobertura do solo, chegando ao mapa de suscetibilidade à inundação representado pela Figura 20.

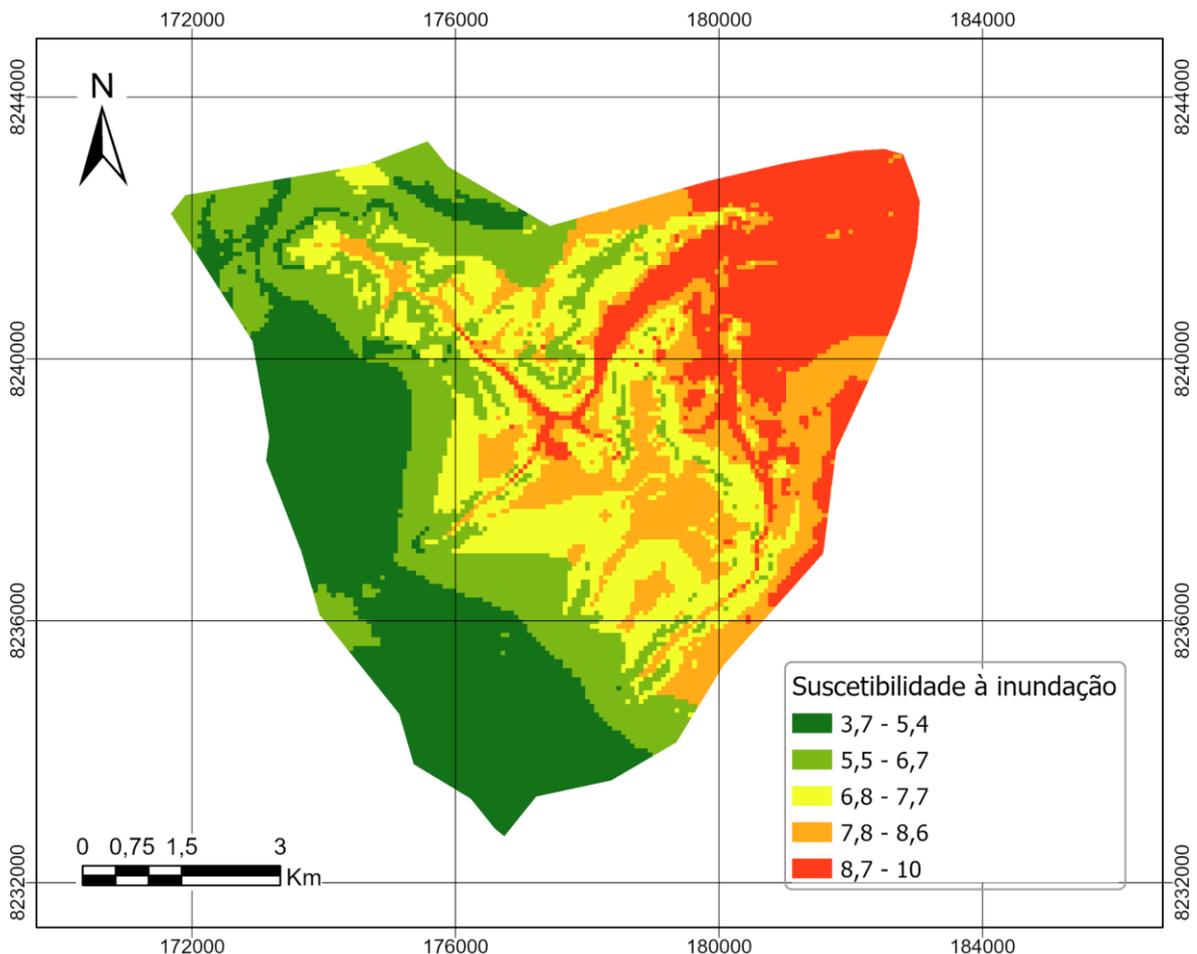


Figura 20 - Mapa de suscetibilidade à inundação da área de estudo.

Em continuidade com a análise, serão apresentados a seguir dois pontos que foram monitorados, ponto de inundação na Vila Cauhy e de rompimento de talude na Metropolitana

que consolidam a representatividade do mapa da Figura 21, pois ambos os pontos se compatibilizam com à região de maior grau de suscetibilidade.

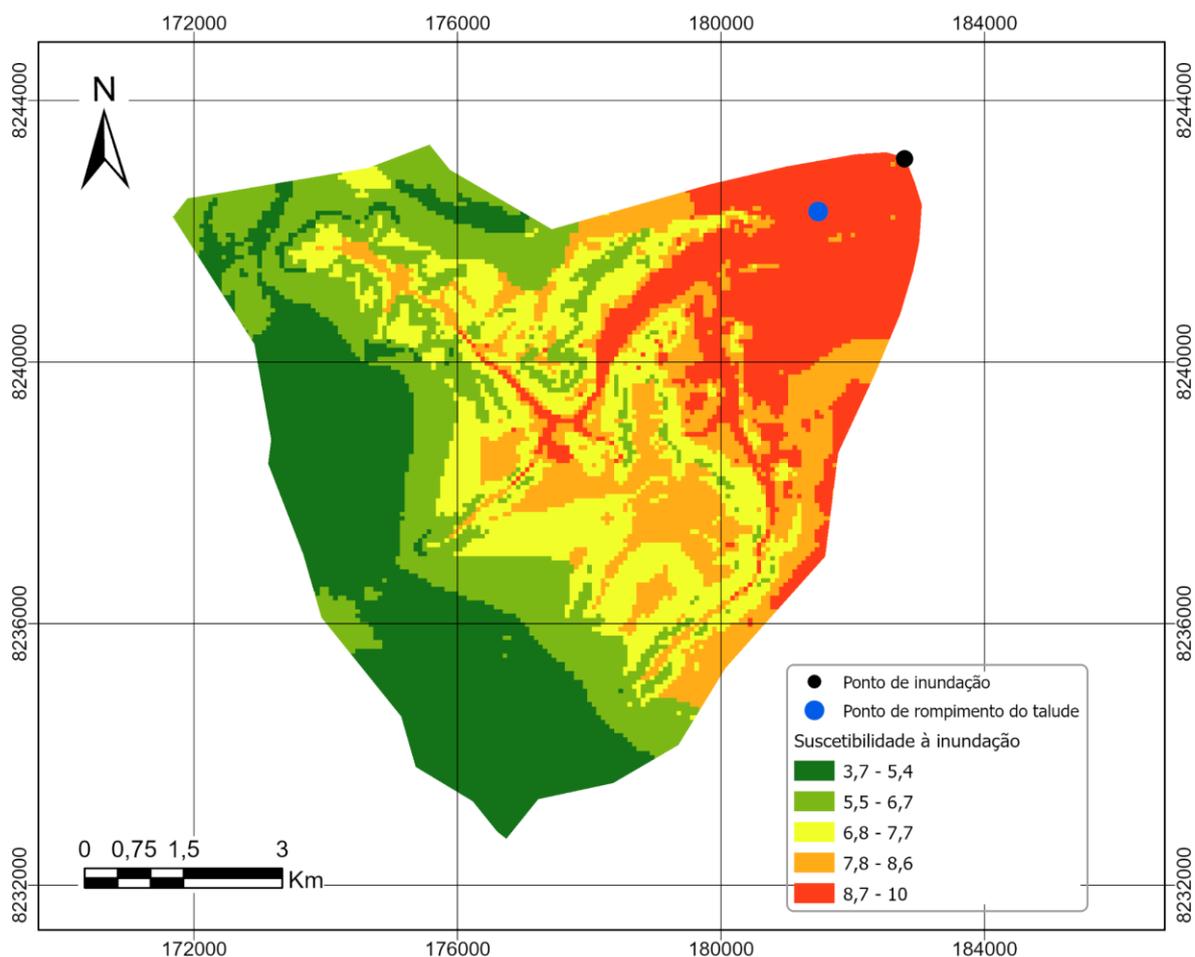


Figura 21 - Mapa de localização do ponto de inundação na Vila Cauhy e de rompimento do talude conjuntamente com a camada de suscetibilidade à inundação.

Sendo assim, nos pontos de inundação já registrados pelos noticiários (Metrópoles, 2021), pode-se notar que a inundação ocorrida deve-se, provavelmente, a urbanização em zonas de APP próximas ao córrego do Riacho Fundo e por se tratar de uma zona que em certos períodos chuvosos do ano naturalmente já sobem seus níveis altimétricos. Em suma, essas regiões não deveriam ser ocupadas devido à importância dessas zonas na proteção de contenção dos sedimentos e erosões, além do fator negativo de poluição causada pela ausência do saneamento e gestão dos resíduos sólidos urbanos advindos dessa comunidade ribeirinha.

Ademais, segundo vistoria realizada em campo e mapeamento da zona onde ocorreu o rompimento do talude na metropolitana, Núcleo Bandeirante, foi constatado que o mesmo fenômeno de ocupação em zonas de APP na Vila Cauhy ocorria na Metropolitana, conforme os registros fotográficos apresentados pelas Figuras 22 e 23. Sendo assim, é importante

observar que este evento de rompimento do talude fez com que o traçado do rio no local mudasse completamente o formato conforme a Figura 24 a seguir.



Figura 22 - Registro fotográfico do rompimento do talude. (Agência Brasília, 2019)



Figura 23 - Registro fotográfico de noticiário que mostram efeitos da inundação ocorrida. (Metrópoles, 2021)



Figura 24 - Comparação do antes(maio/2018) e depois do rompimento do talude(maio/2019).

Dessa forma, fica visível a mudança de traçada de meandros para uma reta, a qual teve uma influência antrópica nessa medida estrutural corretiva de contenção sobre o rompimento de talude, aumentando o escoamento superficial, podendo prejudicar regiões a jusante da mudança desse traçado. Por isso, é fundamental essa medida de contenção estrutural realizada na área de rompimento do talude, no entanto, não se deve esquecer que o presente estudo tem objetivo de mapear áreas suscetíveis à inundação, para que se trace um monitoramento mais eficiente em áreas mais vulneráveis a esses tipos de eventos e tenha uma contenção de gastos, pois investimentos em medidas de mitigação poderiam acarretar em uma não necessidade de obras estruturais corretiva, diminuindo os custos com remediação.

5.7 VULNERABILIDADE AMBIENTAL

O mapeamento do grau de vulnerabilidade ambiental é produto de 4 camadas de suscetibilidade à erosão laminar, à erosão linear, à inundação e às ações antrópicas. Na produção do mapa de vulnerabilidade ambiental utilizou-se da metodologia de Análise Hierárquica de Processos (Saaty, 1987) para a determinação dos níveis de importância de cada fator na área de estudo deste projeto.

Como etapa inicial desta metodologia têm-se a atribuição dos pesos pela comparação paritária de cada fator respeitando a Tabela 1 de escala fundamental e a soma das colunas expressas na Tabela 14.

Tabela 14 - Matriz de comparação paritária dos fatores da vulnerabilidade ambiental.

Fatores	Suscetibilidade a Erosão Laminar	Suscetibilidade a Erosão Linear	Suscetibilidade a inundação	Suscetibilidade a ações antrópicas
Suscetibilidade a Erosão Laminar	1	3	5	0,33
Suscetibilidade a Erosão Linear	0,33	1	3	0,25
Suscetibilidade a inundação	0,2	0,33	1	0,2
Suscetibilidade a ações antrópicas	3	4	5	1
Soma	4,53	8,33	14	1,78

Em seguida, normaliza-se cada célula dessa matriz com a operação de divisão do valor de cada célula pela somatória da coluna correspondente e tira-se a média dos valores das linhas, chegando-se ao valor de autovetor com a multiplicação por 100, tendo em vista que os valores de pesos estão em formato decimal, como pode ser visualizado na Tabela 15.

Tabela 15 - Normalização dos autovetores.

Fatores	Suscetibilidade a Erosão Laminar	Suscetibilidade a Erosão Linear	Suscetibilidade a inundação	Suscetibilidade a ações antrópicas	Pesos	Autovetor (%)
Suscetibilidade a Erosão Laminar	0,22	0,36	0,36	0,19	0,28	28,12
Suscetibilidade a Erosão Linear	0,07	0,12	0,21	0,14	0,14	13,7
Suscetibilidade a inundação	0,04	0,04	0,07	0,11	0,07	6,69
Suscetibilidade a ações antrópicas	0,66	0,48	0,36	0,56	0,51	51,49

De acordo com esta Tabela 15, a ordem decrescente desses valores é de suscetibilidade a ações antrópicas, suscetibilidade à erosão laminar, suscetibilidade à erosão linear e, por último, suscetibilidade à inundação. Isto deve-se ao fato de a vulnerabilidade ambiental representar principalmente a suscetibilidade a processos erosivos devido às causas antrópicas. No entanto, para se prever a consistência desses dados, o método dita que deve ser calculado o autovalor máximo, sendo representado pela multiplicação matricial da matriz

inicial de comparação paritária com os pesos calculados pela Tabela 15 de normalização dos autovetores e, posteriormente, somados, conforme Tabela 16 mostrada a seguir.

Tabela 16 - Soma do produto matricial dos valores da comparação pareada com os pesos.

Fatores	Suscetibilidade a Erosão Laminar	Suscetibilidade a Erosão Linear	Suscetibilidade a inundações	Suscetibilidade a ações antrópicas	SOMA
Suscetibilidade a Erosão Laminar	2,33	3,44	2,17	1,08	9,02
Suscetibilidade a Erosão Linear	0,78	1,15	1,3	0,81	4,04
Suscetibilidade a inundações	0,47	0,38	0,43	0,65	1,93
Suscetibilidade a ações antrópicas	7	4,58	2,17	3,25	17

Contudo, esta etapa anterior é apenas uma das etapas do cálculo do autovalor máximo, em que só é finalizada com média aritmética da divisão dos valores encontrado pela soma dada na Tabela 16 pelo valor de pesos dadas na Tabela 15, encontrando-se o valor de 4,27.

Tabela 17 - Valores de Índice Aleatório.

Dimensão da matriz (i,j)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Coerência aleatória	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - n}{n - 1} \quad (10)$$

Em que,

IC = Índice de Coerência

$\lambda_{máx}$ = autovalor máximo

n = dimensão de matriz

$$RC = \frac{IC}{IA} \quad (11)$$

Em que,

RC = Razão de Consistência

IC = Índice de Coerência

IA = Índice Aleatório

Por fim, tomando-se como base a Tabela 17 de índices aleatórios, a equação de coerência e a equação de Razão de Consistência (RC), calculou-se o RC, para verificar se as comparações paritárias se apresentam como coerentes. Sendo assim, chegou-se ao resultado de RC de 0,09, ou seja, um valor menor que 0,10, portanto a comparação paritária é coerente e a equação final de Vulnerabilidade Ambiental pode ser expressa da seguinte forma:

$$VA = SELA*0,28 + SELI*0,14 + SIN*0,07 + SAAN*0,51 \quad (12)$$

Em que,

SELA = Suscetibilidade à Erosão Laminar

SELI = Suscetibilidade à Erosão Linear

SIN = Suscetibilidade à Inundação

SAAN = Suscetibilidade à Ações Antrópicas

A partir dessa Equação 12 realizou-se operações algébricas de camadas no ambiente SIG, com o auxílio da ferramenta *Raster Calculator*, resultando no mapa final de Vulnerabilidade Ambiental apresentado pela Figura 25.

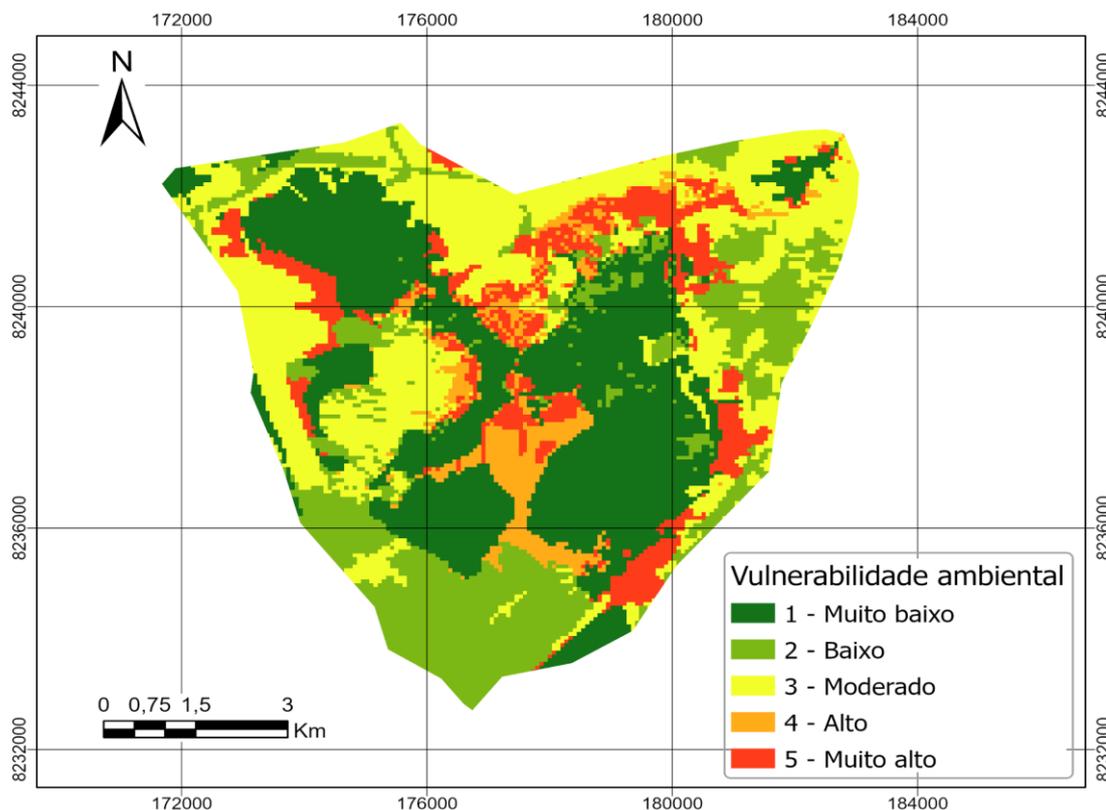


Figura 25 - Mapa de Vulnerabilidade Ambiental

Neste mapa final da Figura 25, as regiões que apresentaram maior grau de vulnerabilidade ambiental foram as zonas urbanas e agrícolas mais recentes, que pode ser explicada pelo maior grau de sensibilidade dos locais mais modificados e com uma menor cobertura vegetal protetora, além de ser regiões menos consolidadas, apresentando-se como mais suscetíveis a processo erosivos, o que colabora significativamente para processo como o caso do ponto de rompimento de talude na metropolitana, Núcleo Bandeirante. Inclusive, o que reforça a veracidade deste mapa de vulnerabilidade ambiental é que os pontos que apresentaram maior vulnerabilidade são os pontos de zonas urbanas menos consolidadas, que apresentam maior potencial erosivo e que podem colaborar para o aumento do escoamento superficial, prejudicando assim zonas mais à jusante do corpo hídrico, como é o caso da Vila Cauhy que se apresenta como um ponto de baixa vulnerabilidade mas que tem um alto potencial de erosividade do solo por se situar em uma zona mais a jusante.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Como análise primária da área de estudo sem interferência antrópica, a partir das características físicas, este estudo contou com o cálculo de indicadores geomorfológicos, mostrando-se como uma eficiente análise prévia no entendimento quanto à tendência natural da unidade hidrográfica estudada quanto aos processos erosivos. Sendo possível a replicação desses indicadores nas bacias hidrográficas do DF como uma análise primária da área a ser estudada.

No mapeamento da suscetibilidade à erosão laminar, este estudo mostrou-se eficiente em uma análise preliminar do sistema, com algumas ressalvas quanto à limitação de estações pluviométricas disponíveis com uma série histórica, além das escalas de dados disponíveis. Dessa forma, é recomendado para estudo com uma análise micro uma validação do estudo em campo, o trabalho com dados com uma maior escala cartográfica e imagens com uma melhor resolução espacial, como imagens georreferenciadas de VANT, que permitem uma melhor distinção das classes temáticas e, assim, da realidade existente.

A metodologia e os resultados apresentados com base em geoindicadores no levantamento de áreas suscetíveis à erosão linear teve uma compatibilização bem marcante na relação com a camada do SISDIA de Risco de Solo por Erosão, o que reforça a representatividade dos diferentes graus apresentados na área de estudo.

No mapeamento de áreas suscetíveis à inundação alcançou-se resultados coerentes com os pontos de inundação e de rompimento do talude, que em visitas a campo pode-se perceber que houve uma influência de todas as alterações antrópicas ocorridas na área de estudo, principalmente com a ocupação urbana próximas a zonas do rio que influenciaram no aumento do escoamento superficial e nas fragilidades desses ambientes ribeirinhos. Portanto, o estudo apresentado de suscetibilidade à inundação constitui-se como uma análise prévia no levantamento dessas regiões mais sensíveis a esse fator. No entanto, foi em visitas realizadas em campo que pôde-se constatar algumas causalidades desses ocorridos de rompimento de talude e de inundação, o qual pode ser visualizado uma forte relação com as ocupações irregulares em zonas próximas ao rio.

Por conseguinte, na análise final de vulnerabilidade ambiental da área de estudo alcançou-se resultados coerentes com a realidade em uma análise de toda a paisagem e também, em uma análise preliminar da área de estudo, tendo em vista que as áreas mais vulneráveis foram as regiões mais antropizadas e menos consolidadas, ou seja, com um menor grau de vegetação protetora e com uma recente urbanização de impermeabilização do solo.

Face ao exposto, em uma análise preliminar da vulnerabilidade ambiental na região de estudo, este projeto final de graduação em engenharia ambiental se mostrou eficiente no mapeamento da vulnerabilidade ambiental como ferramenta prévia que pode subsidiar a gestão territorial conjuntamente com o ZEE-DF, com a ressalva de que, para análise futuras, recomenda-se a utilização de imagens com uma melhor resolução espacial para uma melhor diferenciação dos objetos contidos nas imagens e, assim, permitindo até mesmo uma análise mais micro da área de estudo.

Sendo assim, como o ZEE-DF é um instrumento normativo para subsidiar um planejamento e gestão territorial que preza pelo desenvolvimento socioeconômico sustentável, este estudo de mapeamento das áreas mais sensíveis aos processos erosivos e de inundação torna-se uma ferramenta complementar nesta gestão territorial sustentável frente às tomadas de decisões. Por fim, como análise final, pôde-se avaliar que segundo os indicadores geomorfológicos, que medem a suscetibilidade a processos erosivos do ambiente em natura sem a interferência antrópica, a área de estudo apresentou uma baixa suscetibilidade a processos erosivos, por isso, é interessante ressaltar que o aumento da suscetibilidade aos processos erosivos e de inundação deveu-se à modificação e interferências antrópicas na área de estudo que colaboraram significativamente para os efeitos de aumento do escoamento superficial, da taxa de impermeabilização e, principalmente, na diminuição da cobertura vegetal nativa, a qual permite uma mitigação no processo de infiltração de água no solo.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ADASA. Superintendência de Drenagem Urbana. Manual de Drenagem e Manejo de Águas Pluviais Urbanas do Distrito Federal. 2018.

Ageitec, Embrapa. Cambissolos Háplicos. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000gn1sf65m02wx5ok0liq1mqzx3jrec.html> Acesso em: 24 de Março de 2022.

Ageitec, Embrapa. Latossolos vermelhos. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONT000fzyj aywi02wx5ok0q43a0r9rz3uhk.html#:~:text=Ag%C3%AAncia%20Embrapa%20de%20Informa%C3%A7%C3%A3o%20Tecnol%C3%B3gica,e%20estrutura%20uniformes%20em%20profundidade>. Acesso em: 24 de março de 2022.

Agência Brasília (2019). Ação rápida do GDF garante segurança à população do Núcleo Bandeirante. Disponível em: <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2019/02/16/acao-rapida-do-gdf-garante-seguranca-a-populacao-do-nucleo-bandeirante/>> . Acesso em 14 de outubro de 2021.

Agência Brasília. 2019. Ação rápida do GDF garante segurança à população do Núcleo Bandeirante. Disponível em: <<https://www.agenciabrasilia.df.gov.br/2019/02/16/acao-rapida-do-gdf-garante-seguranca-a-populacao-do-nucleo-bandeirante/>>. Acesso em: 21 de março de 2022.

Almeida *et al.* (2017). Erosão em Borda de Reservatório. Cap. 14. Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas. 2017.

Almeida et al. Análise morfométrica em bacias hidrográficas fluviais como indicadores de processos erosivos e Aporte de sedimentos no entorno do reservatório da usina hidrelétrica (uhe) Corumbá IV. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 14, n. 2, p.135-149, 2013.

ALMEIDA, W. S.; SOUZA, N. M.; CARVALHO, J. Camapum. (2012). Produção de carta geotécnica preliminar da capacidade de infiltração de água no solo em uma área do entorno do reservatório da usina hidrelétrica de Corumbá IV (GO). In: José Camapum de Carvalho; Gilson de Farias Neves Gitirana Junior; Eufrosina Terezinha Leão Carvalho. (Org.). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. 1ed. Brasília: Universidade de Brasília, v. 4, p. 581- 606.

- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (1990). Conservação do solo. Piracicaba: Livroceres. 3. ed. São Paulo: Ícone, 355 p.
- BRASIL. Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002. Estabelece critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Brasil - ZEE, e dá outras providências. [S. l.], 10 jul. 2002.
- BRASIL. Lei nº 6.269, de 29 de janeiro de 2019. Estabelece critérios para o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal – ZEE-DF, e dá outras providências. [S. l.], 29 jan. 2019.
- CAMAPUM DE CARVALHO, J.; LIMA, M. C.; MORTARI, D. Considerações sobre prevenção e controle de voçorocas. In: 7º SIMPÓSIO NACIONAL DE CONTROLE DE EROSIÃO, ABGE. Goiânia – GO. Documento eletrônico em CD-ROM. 2001, 10 p.
- CAMAPUM, J.C; SALES, M.M.; DIOGENES, M.; FAZIO, J.A.; MOTTA, N.O.; FRANCISCO, R. A. (2006) Processos erosivos. In: CAMAPUM, J. C.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO. M.T.S. (Org.). Processos erosivos no centro-oeste brasileiro. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC. p. 39-88.
- CÂMARA., 1996. Desenvolvimento de Sistemas de Informação Geográfica no Brasil: Desafios e Oportunidades. In: Semana de Geoprocessamento do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- CAMPAGNOLI F. (2002). A aplicação do assoreamento na definição de geoindicadores ambientais em áreas urbanas: exemplo na Bacia do Alto Tietê, SP. Tese de Doutorado, Escola Politécnica, USP, São Paulo, 195p.
- Carneiro,2019. Fragilidade ambiental em bacias hidrográficas do vão do Paranã - GO. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Goiás. Instituto de estudos socioambientais. Ciências ambientais. 51 p.
- CARVALHO, N.O. (2001). Produção de sedimentos em função da variabilidade climática. O estudo de caso da área contribuinte ao reservatório de Três Marias, região do Alto São Francisco. Projeto BRA/00/029, ANEEL, PNUD, CT Brasil, Brasília, DF, 51p.
- Castro, 1998. Glossário de defesa civil - Estudos de riscos e medicina de desastres. 2ª edição. Ministério do planejamento e orçamento. Departamento de defesa civil. Brasília. 173 p.

- Castro, Selma; Hernani, Luis. 2015. Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade. Embrapa, Brasília, 2015.
- CERRI, L. E. S.; SILVA, J. A. F.; SANTOS, P. H. P. (1997). Erosão do solo: aspectos conceituais. Revista Universidade Guarulhos. Geociências, II (6). p. 92-98.
- CHOW V. T. (1988) Applied Hydrology. 1ª ed. New York, McGraw Hill.
- Correchel, 2003. Avaliação de índices de erodibilidade do solo através da técnica da análise da redistribuição do "fallout" do Cs. Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutora em Ciências. 99 p.
- CORREIA *et al.*, (2016). Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do rio Bengalas, Nova Friburgo, RJ, utilizando o potencial de geotecnologias na definição de áreas de risco de inundação. Revista Brasileira de Cartografia, v. 67, n. 6. Geomorfologia, v. 13, n. 2.
- Crepani et al., 2001. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento econômico e ao ordenamento territorial. Inpe. Junho de 2001. 103 p.
- Crepani, Valeriano e Martini. Geologia e geomorfologia. Inpe. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/DSR/areas-de-atuacao/topicos-de-pesquisa/geologia-geomorfologia#:~:text=A%20Geomorfologia%20estuda%20a%20origem,por%20fatores%20end%C3%B3genos%20e%20ex%C3%B3genos>>. Acesso em: 29 de março de 2022.
- EMBRAPA. 2004. Mapa pedológico na escala de 1:100.000 do Distrito Federal.
- FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. (2013). Comparação dos modelos HECRAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. Volume 34. p.63-73.
- GOMES et al. AVALIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NATURAL DO SOLO EM ÁREAS AGRÍCOLAS: SUBSÍDIO À AVALIAÇÃO DO RISCO DE CONTAMINAÇÃO DO LENÇOL FREÁTICO POR AGROQUÍMICOS. Pesticidas: R.Ecotoxicol. E Meio Ambiente, Curitiba, v. 12, p. 169-179, jan./dez. 2002.

- HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; De MARIA, I.C.; CASTRO FILHO, C. & LANDERS, J.C. (2002). A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E. & PERES, J.R.R., eds. Uso agrícola dos solos brasileiros. Rio de Janeiro, Embrapa. p.47-60.
- HORTON, R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. New York: Geological Society of American Bulletin, v. 56, p. 807-813, 1945.
- INPE, 2002. Manual de tutoria do software SPRING. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/manuais.html>>. Acesso em: 1 de abril de 2019.
- INPE. Catálogo de imagens. 2019.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1986). Paranapanema. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Vol.6. (IPT, relatório, 24.739), (C.P; ME), São Paulo, SP.
- JESUS, A. S. (2013). Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis – GO. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 367p.
- LAMBERT-TORRES, GERMANO; COSTA, C.I.A.; BARROS, M; MARTINS, H.G. (2007). Processo de Análise Hierárquica Paraconsistente. VI Congress of Logic Applied to Technology. Santos, Brasil.
- LIMA, M.C.; ALMEIDA, J.G.; MEDEIROS, G. (2017). Sulcos, ravinas e voçorocas. In: SALES, M.M.; DE CARVALHO, J. C.; MASCARENHA, M.M. *et al.* (2017). Erosão em Borda de Reservatório. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, cap.04, p.65-90.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. (1992). Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, Campinas, 51(2): pp. 189-196.
- MACÊDO, I. L. (2009). Estudo de modelos em ambiente de geoprocessamento para a previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: o caso da Bacia do Rio Indaiá-UHE Três Marias, MG. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 312p.
- MEDEIROS, 2011. Norteando seus conhecimentos sobre Geotecnologias.
- MENDONÇA *et al.*, 2011. Uso das Geotecnologias para Gestão Ambiental: Experiências na Amazônia Meridional.

- Menezes *et al.*, 2017. Geotecnologias aplicadas à gestão ambiental. Gestão ambiental: perspectivas, conceitos e casos. Volume especial.
- Metrópoles. 2021. Moradores da Vila Cauhy lamentam perdas após inundação. Disponível em: <<https://www.metropoles.com/distrito-federal/moradores-da-vila-cauhy-lamentam-perdas-apos-inundacao-desespero>>. Acesso em: 21 de março de 2022.
- MOORE, I.; BURCH, G. (1986). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. In: Soil Science Society of America Journal. p- 1294-1298.
- NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE - NRCS. Urban hydrology for small watersheds. United States Department of Agriculture USDA.1986.
- Nogueira, 2017. Mapeamento da suscetibilidade à inundação na bacia hidrográfica do Ribeirão da Fábrica, Município de Patos de Minas – MG. Universidade de Federal de Uberlândia. Programa de pós-graduação em qualidade ambiental. Instituto de ciências agrárias – ICIAG.
- NUNES, F. G; FABRIZIA, G. N. (2007). A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE VENTTECHOW – SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS) NA ESTIMATIVA DA VAZÃO MÁXIMA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ATUBA. Revista Eletrônica do Programa de Pós-Graduação em Geografia - UFPR, v. 2, n. 2. p. 139-155.
- OLIVEIRA, A. M. dos. S. (1994). Depósitos tecnogênicos e assoreamento de reservatórios. Exemplo do reservatório de Capivara, rio Paranapanema, SP/ PR. 211 p. Tese (Doutorado) - Departamento de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP, São Paulo
- PORTO, R. M. (2006). Hidráulica Básica. São Carlos. Ed. EESC-USP. 540p.
- Reatto et al., 2000. Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do Olario - DF escala 1:30.000. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2000.
- SAATY, T.L. (1980). “The Analytic Hierarchy Process”. McGraw-Hill, New York. 287p.
- SANSOLO, D. G.; BACK, G. O Ensino de Geoprocessamento para Estudantes de Turismo: Uma Discussão sobre suas potencialidades. In: V Seminário de Pesquisa em Turismo do MERCOSUL (SeminTUR), 2008, p. 4. Caxias do Sul, RS.
- Santos *et al.* (2007). Vulnerabilidade Ambiental Desastres naturais ou fenômenos induzidos. Ministério do Meio Ambiente. Brasília. 196p.
- SARTORI, A. Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN. Campinas, São Paulo. 2010.

- SEDUH. 2009. Curva de nível de 5 metros. Disponível em: <<https://www.geoportal.seduh.df.gov.br/geoportal/>>. Acesso em: 16 de agosto de 2019.
- SENA, Felipe Gomes. Análise de suscetibilidade à erosão (estudo de caso: Bacia do Rio Maranhão: FERCAL, DF). 2019. 26 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geoprocessamento Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.
- TAGLIANI, C. R. A. (2003). Técnica para avaliação da vulnerabilidade ambiental de ambientes costeiros utilizando um Sistema Geográfico de Informação. Revista FatorGIS. 8 p.
- TUCCI *et al.* (2007). Inundações urbanas. Porto Alegre: ABRH/RHAMA.
- TUCCI *et al.*, 1993. Hidrologia - Ciência e Aplicação. Porto Alegre: Ed. UFRGS/Edusp/ABRH, 1993. 943 p.
- TUCCI *et al.*, 1995 Enchentes urbanas in: Drenagem Urbana, cap. 1 Editora da Universidade, ABRH.
- U. S. Army Corps of Engineers (USACE), 2010. HEC-HMS: Hydrologic Modeling System, Reference Manual. Califórnia.
- VILELLA, S. M.; MATTOS, A. Hidrologia Aplicada. São Paulo: McGraw-Hill. 1975. 245p.
- Wichmeier e Smith, 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. Washington: USDA, 1978. 58p. Agricultural Handbook, 537.
- WILKEN, P. S. (1971). Águas Pluviais: Contribuição ao Estudo dos Métodos de Dimensionamento de Estruturas Hidráulicas para o Esgotamento de Águas Pluviais. 1ª ed. São Paulo, Edição do autor.