

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

ESTUDO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DEVIDO À
EXPANSÃO URBANA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIBEIRÃO TABOCA (DF)

GABRIEL MARTINS SILVA

ORIENTADOR: WAGNER SANTOS DE ALMEIDA, DSc

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: JULHO/2019

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

**ESTUDO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DEVIDO À
EXPANSÃO URBANA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO
RIBEIRÃO TABOCA (DF)**

GABRIEL MARTINS SILVA

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 (UnB)
(ORIENTADOR)**

**FELIX ALVES DA SILVA JÚNIOR, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**ELEUDO ESTEVES DE ARAÚJO SILVA JÚNIOR, MSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 08 de dezembro de 2018.

FICHA CATALOGRÁFICA

SILVA, GABRIEL MARTINS

Estudo da vulnerabilidade ambiental devida à expansão urbana na bacia hidrográfica do Ribeirão Taboca, DF.

xii. 65 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Vulnerabilidade Ambiental

2. Expansão Urbana

3. Inundação

4. Erosão

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA,G.M. (2019) ESTUDO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DEVIDO À EXPANSÃO URBANA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO TABOCA (DF). Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 77 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Gabriel Martins Silva

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Estudo da vulnerabilidade ambiental devida à expansão urbana na bacia hidrográfica do Ribeirão Taboca, DF.

GRAU/ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

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.

Gabriel Martins Silva
gabmartinssilva@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, e mais importante, agradeço ao meu Deus, por se manifestar ao longo da minha história de maneira tão forte, pelo seu infinito amor e misericórdia para comigo, por me permitir finalizar essa graduação, mesmo com todos os desafios e dificuldades no meio do caminho, e a minha Virgem Mãe Maria, intercessão e cuidado maternal para comigo.

Agradeço aos meus pais, Uelinton e Vanusa e irmãos Rafael e Miguel, toda minha família a Marlene, pela a infinita paciência para comigo neste tempo, por toda a ajuda, compreensão e encorajamento desde o período de estudos para o vestibular, até as longas madrugadas de estudo e trabalhos. Eu os amo muito, obrigado por tudo.

A todos os colegas de trabalho do WWF-Brasil, Topocart PRO e Concreta Consultoria e Serviços, locais onde tive fantásticas experiências profissionais que muito acrescentaram em minha vida, em especial meus tutores diretos, Alessandra Manzur, Mariana Soares e Rafael Oliveira, pelo aprendizado ao longo desse período.

A todos meus amigos do ensino médio, em especial Pedro Henrique Rosa, Fabio Trevizolo, Yuri Castro, João Siriano, Pedro Araújo que desde o início da graduação foram companhias extremamente importantes ao longo dessa jornada.

Aos colegas e amigos do 1º/2014, do curso de engenharia ambiental e todos os que eu tive a honra de conhecer ao longo desses 5 anos na Universidade, em especial, Rebeca Borges, Maria Beatriz, Eduardo Arima, Gustavo, Luísa, Natalia, Deborah, Bruna, Pedro, Victor, Mateus Lima, Mateus Martins, Rafael Monteiro, Daniela, Camila, Felipe, Ana Paula, Arthur, Alexandre, Leonardo, Ygor, Mariana e todos os outros não nomeados.

Ao professor Wagner por me apoiar, mesmo quando só haviam dificuldades e obstáculos no caminho e acima de tudo pelo voto de confiança. E a todos os bons professores que tive na Universidade.

A todos meus irmãos da Comunidade 14 da Paróquia Nossa Senhora da Assunção, ao Padre Manolo e aos meus catequistas, pelas orações e toda a ajuda e apoio recebidos. I thank all the members from the Redemptoris Mater Seminary of Pretoria, my rector Juan Jesus, to break all the laws to allow me to finish my studies, the seminarians; Roberto, Matteo, Charles, Ronwynne, Tabuaka to be patients with me during these semester, and special way, Mauricio, to help in these time in Brazil, my catechists and my community of Capital Park.

RESUMO

ESTUDO DA VULNERABILIDADE AMBIENTAL DEVIDO À EXPANSÃO URBANA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO TABOCA (DF).

Autor: Gabriel Martins Silva

Orientador: Wagner Santos de Almeida

A expansão urbana ao longo da Região Administrativa do Jardim Botânico, parte inserida a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Taboca, aconteceu de maneira irregular a partir do ano de 1997, sem um devido planejamento ou diretrizes a serem seguidas. Por meio desta pesquisa buscou-se avaliar a Vulnerabilidade Ambiental desta Bacia, ou seja, a susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial causado por alguma atividade antrópica. A Vulnerabilidade Ambiental foi avaliada aplicando a Análise Hierárquica de Processos, por meio de um mapa de suscetibilidade às Ações Antrópicas, criado por meio da sucessão das classes de uso antrópico dos mapas de uso e ocupação do solo para os anos de 2000, 2011, 2014 e 2018, um mapa de suscetibilidade à erosão laminar, calculado por meio das Equações Universais de Perda de Solo (EUPS), um mapa de suscetibilidade à erosão linear, calculado por meio de geoindicadores, e um mapa de suscetibilidade a inundação, calculado usando o modelo de chuva-vazão de Vem te Chow e o modelo hidrológico do HEC-RAS. Por meio do mapa de Vulnerabilidade Ambiental devido à Expansão Urbana obtiveram-se áreas frágeis, suscetíveis processos erosivos, inundações, desmoronamento e que também acontece ocupação urbana, podendo servir de instrumento para a gestão e controle territorial da Bacia. As áreas menos suscetíveis, coincidiram com as áreas de zonas homólogas Platô, planas e marcadas por uma urbanização já consolidada, enquanto próximos as área de relevo ondulado, grandes declividade e próximos aos corpos d'água a vulnerabilidade foi maior.

Palavras chave: Vulnerabilidade Ambiental, EUPS, erosão linear, erosão laminar, inundação, HEC-RAS, geoprocessamento, expansão urbana.

SUMÁRIO

1) INTRODUÇÃO.....	1
1.1. ÁREA DE ESTUDO	2
2) OBJETIVO DA PESQUISA	4
2.1. OBJETIVO GERAL.....	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. VULNERABILIDADE AMBIENTAL	5
3.2. EROSÃO.....	5
3.3. MODELOS PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO	7
3.3.1. Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)	8
3.3.1.1. Fator de Erosividade da Chuva (R).....	9
3.3.1.2. Fator de Erodibilidade do Solo (K).....	9
3.3.1.3. Fator de Comprimento de Rampa e Grau de Declive (LS)	11
3.3.1.4. Fator de Uso e Manejo do Solo (C)	12
3.3.1.5. Fator de Prática Conservacionista (P)	12
3.3.2. Modelo Qualitativo Baseado em Geoindicadores para Avaliação da Erosão Linear.....	12
3.4. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG).....	15
3.5. USO E COBERTURA DO SOLO.....	16
3.6. ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS	17
3.7. ENCHENTES E INUNDAÇÃO	19
3.8. MÉTODO VEM TE CHOW	20
3.9. MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS	25
3.10. AÇÃO ANTRÓPICA	27
4) MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. MATERIAIS	28
4.1.1. Softwares	28
4.1.2. Imagens	28
4.1.3. Base cartográfica	28
4.2. MÉTODOS	31
4.2.1. Mapas de uso e cobertura do solo.....	32

4.2.2. Mapa de susceptibilidade à erosão laminar	34
4.2.3. Mapa de susceptibilidade à erosão linear	35
4.2.4. Mapa de áreas suscetíveis à inundação	36
4.2.4.1. Modelagem Hidrológica	36
4.2.4.2. Modelagem Hidráulica	38
4.2.6. Mapa de susceptibilidade às ações antrópicas.....	40
4.2.5. Mapa de vulnerabilidade ambiental	41
5) RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1. MAPA DE SUSCETIBILIDADE ÀS AÇÕES ANTRÓPICAS	42
5.2. ZONAS HOMÓLOGAS DE RELEVO E USO DO SOLO	45
5.3. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LINEAR.....	46
5.4. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LAMINAR.....	50
5.5. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO	52
5.6. MAPA DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL	55
6) CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Valores de erodibilidade (fator k) (adaptado Almeida <i>et al.</i> ,2012).....	10
Tabela 3.2: Fatores C e P para classes de uso e cobertura do solo (adaptado Almeida <i>et al.</i> , 2012).....	12
Tabela 3.3: Escala de vulnerabilidade à erosão e intemperismo de rochas (Crepani <i>et al.</i> , 2001).....	13
Tabela 3.4: Atributos para cruzamento dos mapas de pedologia e geomorfologia (Adaptado de Campagnoli, 2002).....	14
Tabela 3.5: Atributos para cruzamento do mapa geopedológico e de declividade (Adaptado de Campagnoli, 2002).....	14
Tabela 3.6: Escala Fundamental proposta por Thomas Saaty (1980).....	18
Tabela 3.7: Valores dos números CN para bacias rurais (Tucci, 2009).....	21
Tabela 3.8: Valores dos números CN para bacias urbanas e suburbanas (Tucci, 2009).....	22
Tabela 3.9: Valores de Z correlacionados com a relação td/tp. (Wilken, 1971).....	24
Tabela 3.10: Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning (Porto, 2006).....	26
Tabela 4.1: Imagens de sensores remotos utilizadas.....	28
Tabela 4.2: Estações pluviométricas usadas na pesquisa.....	30
Tabela 4.3: Valor de erodibilidade das classes de pedologia.....	35
Tabela 4.4: Classificação do grau de suscetibilidade a erosão das Unidades Pedológicas.....	36
Tabela 4.5: Classificação do grau de suscetibilidade a erosão das Unidades Geológicas.....	36
Tabela 4.6: Graus de vulnerabilidade atribuídos a classes do mapa de vulnerabilidade à ações antrópicas.....	40
Tabela 5.1: Quantitativo de área das classes de uso e cobertura do solo.....	43
Tabela 5.2: Quantitativo do crescimento das áreas antrópicas.....	44

Tabela 5.3: Quantitativo de área das zonas homólogas.....	45
Tabela 5.4: Vazão de projeto para os tempos de retorno usados como dados de entrada para o HEC-RAS.....	53
Tabela 5.5: Área alagada e porcentagem alagada em comparação a área total da bacia.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Localização da área de estudo, a microbacia do Ribeirão Taboca	03
Figura 1.2: Fotos de Condomínio Irregular na área de estudo.....	04
Figura 3.1: Tipos de erosão.....	06
Figura 3.2: Técnica de avaliação do terreno por zonas homólogas (Brink <i>et al.</i> , 1966, <i>apud</i> Almeida <i>et al.</i> , 2012).....	15
Figura 3.3: Representação da planície de inundação de um rio (Tucci, 2007).....	19
Figura 4.1: Mapas temáticos de pedologia e geologia utilizados na pesquisa.....	29
Figura 4.2: Mapa com o Modelo Numérico de Terreno (MNT).....	31
Figura 4.3: Metodologia para produção de Mapa de Vulnerabilidade Ambiental (Adaptado Almeida et al, 2017).....	32
Figura 4.4: Etapas para o mapa de uso e cobertura do solo (Adaptado Almeida et al, 2012).....	34
Figura 4.5: Fluxograma para o cálculo da vazão de projeto segundo o método de Vem Te Chow.....	37
Figura 4.6: Fluxograma para o traçado das áreas suscetíveis as inundação no HEC-RAS.....	38
Figura 4.7: Geometria de entrada para o software HEC-RAS.....	39
Figura 4.8: Seção tridimensionalizada, com inundação para TR de 100 anos.....	39
Figura 5.1: Mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2000, 2011, 2014 e 2018.....	42
Figura 5.2: Mapa de avanço do processo de urbanização.....	44
Figura 5.3: Mapa com as zonas homólogas de relevo e uso do solo.....	45
Figura 5.4: Mapa com a pedologia e geologia reclassificada segundo as zonas homólogas....	46
Figura 5.5: Mapa de Geopedologia.....	47

Figura 5.6: Mapa de declividade, em graus, dividido em zonas de vulnerabilidade.....	48
Figura 5.7: Mapa de suscetibilidade a erosão linear.....	49
Figura 5.8: Voçoroca localizada no ponto 1 indicado no mapa da figura 5.7.....	50
Figura 5.9: Parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS).....	51
Figura 5.10: Mapa de suscetibilidade à erosão laminar.....	52
Figura 5.11: Hidrograma unitário de escoamento.....	53
Figura 5.12: Áreas suscetíveis à inundação calculadas pelo HEC-RAS.....	54
Figura 5.13: Mapa de Vulnerabilidade Ambiental devido à expansão urbana.....	57

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
ANA	Agência Nacional de Águas
AHP	Análise Hierárquica de Processos
C	Fator de uso e manejo do solo
CAD	<i>Computer-aided design</i>
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
GDF	Governo do Distrito Federal
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>
HEC-RAS	<i>Hydrologic Engineering Center - River Analysis System</i>
IVDN	Índice de vegetação por diferença normalizada
K	Fator de erodibilidade dos solos
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
MS	Multiespectral
M	Metro
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PAN	Pancromático
PDOT	Plano diretor de ordenamento territorial
P	Fator de práticas conservacionistas
R	Fator de Erosividade da Chuva
RC	Razão de Consistência
SEGETH	Secretaria de estado de gestão do território e habitação
SIEG	Sistema Estadual de Geoinformação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
TR	Tempo de retorno
USGS	<i>United States Geological Surve</i>
UnB	Universidade de Brasília

1) INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é uma tendência global, segundo estudo das Nações Unidas (ONU), em que no ano de 2005 o grau de urbanização da população mundial atingiu 48,6% com previsão para o ano de 2010 de ultrapassar 50,6%, com taxa média de crescimento da população urbana de 1,98% ao ano. Esse índice é variável com análise regional, na América Latina e Caribe a taxa ultrapassa os 79,4% (ONU, 2007 *apud* Santos *et al.*, 2010).

A população brasileira, segundo o censo do IBGE (2010), vive 84% em áreas urbanas e 16% em áreas rurais, resultado de um processo de êxodo rural e modernização tecnológica a partir da década de 1960. O processo de êxodo rural não foi devidamente acompanhado por políticas para oferta de serviços públicos e infraestrutura urbana, o que vem acarretando processos de favelização crescentes na Região Sudeste, em que 49,8% da população vive em favelas.

O processo de urbanização sem o devido planejamento é acompanhado por supressão da vegetação natural, impermeabilização e compactação do solo o que aumenta o escoamento superficial e, conseqüentemente, os processos erosivos ficam mais intensos, além de aumentar o risco de inundação. O Brasil está muito suscetível a ocorrências de movimento de massa devido às condições climáticas, intensas chuvas de verão associadas a ocupação antrópica nas vertentes (Guimarães *et al.*, 2008). A redução da capacidade de infiltração e aumento do escoamento superficial pode levar às inundações, na ausência de um sistema de drenagem adequado (Tucci, 2007).

Autores como Tricart (1977, *apud* Crepani, 2008) estabeleceram que a vulnerabilidade ambiental devido à perda de solo está diretamente relacionada com meios instáveis como condições bioclimáticas agressivas, relevos dissecados, inexistência de cobertura vegetal densa, planícies e fundos de vales sujeitos a inundação e geodinâmica interna intensa.

No Distrito Federal a Região Administrativa do Jardim Botânico, antiga área das fazendas Taboquinha e Papuda, teve processo de ocupação urbana iniciado no ano de 1997 com a instalação de condomínios irregulares. No ano de 2004 a ocupação urbana na região se intensificou bastante sem o devido planejamento urbano.

Em 2017, o Governo do Distrito Federal (GDF) iniciou o processo de regularização de alguns condomínios da Região Administrativa do Jardim Botânico, oficialmente são 23 que, segundo a Pesquisa Distrital por Amostra de Domicílios (CODEPLAN, 2016) possuem 27.364

habitantes com uma renda domiciliar média de 14,61 salários mínimos e 83,58% dos domicílios não estão regularizados, e esse crescimento antrópico acarreta aumento significativo na sua vulnerabilidade ambiental.

As metodologias para avaliação de vulnerabilidade ambiental, segundo (Crepani *et al.*, 2008), podem subsidiar o estudo para aptidão agrícola, estudos de incompatibilidade legal de terras, indicação de usos adequados para parcelas de solo a serem utilizadas como subsídios à gestão territorial, na aplicação de um Zoneamento Ecológico e Econômico (ZEE), visto que a metodologia aborda varias variáveis ambientais e sociais.

Neste estudo busca-se avaliar o impacto da urbanização irregular no aumento da vulnerabilidade ambiental relacionada a processos erosivos e de impermeabilização do solo, por meio da avaliação, do uso e da cobertura do solo, das características hidrológicas, pluviométricas e do relevo de uma bacia hidrográfica em uma área de estudo, a fim de subsidiar a minimização dos riscos advindos desses processos erosivos, do aporte de sedimentos e da inundação. A metodologia aplicada nesta pesquisa pode ser replicada para outras bacias hidrográficas com intenso processo de ocupação antrópica a fim de subsidiar seu planejamento urbano.

1.1. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente trabalho é um trecho da sub-bacia do Ribeirão Taboca localizada na Região Administrativa XXVII – Jardim Botânico e será definida como microbacia do Ribeirão Taboca. A microbacia é tributária à bacia hidrográfica do Rio São Bartolomeu (DF). A área da microbacia é de 22,73 km² e localiza-se entre as coordenadas geográficas 15°50' e 15°5' de latitude sul e 47°44' e 47°49' de longitude oeste. A microbacia foi delimitada com o exutório fixado no ponto de afluência entre o Córrego Taboquinha e o Ribeirão Taboca, abrangendo a área de contribuição do trecho inicial do Ribeirão Taboca e do Córrego Forquilha da Taboca, conforme representado na Figura 1.1 com imagem do satélite PLEIADES de 2017 disponibilizada no GEOPORTAL.

Segundo Da Silva & Steinke (2009), a microbacia do Ribeirão Taboca possui uma dinâmica de ocupação caracterizada predominantemente por condomínios horizontais, relevo dissecado e não há um correto planejamento de uso e ocupação de solo que considere a hidrografia local. Em visita de campo à área de estudo verificou-se no extremo oeste da microbacia uma ocupação urbana mais consolidada e vários pontos de expansão urbana, e a Figura 1.2

apresenta fotografias obtidas nessa visita de campo, em que é possível observar a presença de um condomínio irregular, em que houve o aterramento de uma grota de escoamento, e percebe-se o início de processo erosivo.

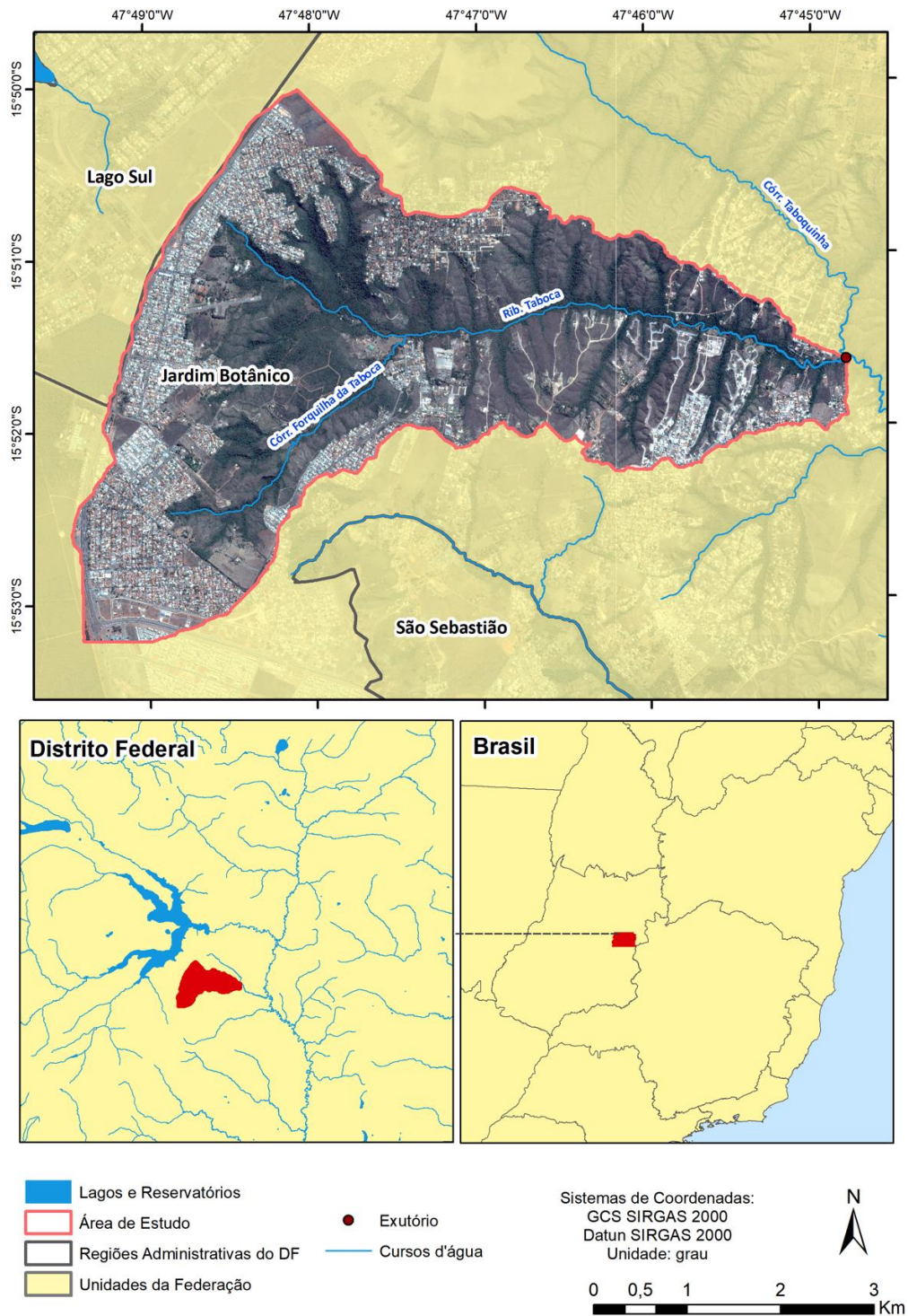


Figura 1.1: Localização da área de estudo, a microbacia do Ribeirão Taboca.



Figura 1.2: Fotos de Condomínio Irregular na área de estudo.

2) OBJETIVO DA PESQUISA

2.1. OBJETIVO GERAL

O presente projeto tem como objetivo geral a avaliação da vulnerabilidade ambiental devido à ocupação urbana em um trecho da Bacia do Ribeirão Taboca na Região Administrativa do Jardim Botânico no Distrito Federal, por meio de análise multicritério em ambiente de geoprocessamento.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos do projeto estão listados a seguir:

- Avaliar as alterações no uso e cobertura do solo na microbacia do Ribeirão Taboca durante os anos de 2000, 2011, 2014, 2018.
- Avaliar o risco de inundação ao longo do Ribeirão Taboca e do Córrego Forquilha da Taboca a partir de modelagem hidrológica.
- Avaliar o risco de erosão linear e laminar na microbacia do Ribeirão Taboca.

3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. VULNERABILIDADE AMBIENTAL

O termo vulnerabilidade ambiental, segundo a proposta de Tagliani (2003), é a susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial causado por alguma atividade antrópica, segundo três critérios: a fragilidade estrutural intrínseca, características intrínsecas do substrato físico caracterizadas pela declividade e capacidade de uso do solo, a sensibilidade de ecossistemas próximos e o grau de maturidade dos ecossistemas, avaliando esses critérios segundo a Lógica *Fuzzy* na presente pesquisa.

É importante diferenciar a vulnerabilidade ambiental de fragilidade ambiental que é conceituada como a desestabilização do equilíbrio dinâmico intrínseco existente no ambiente por fatores naturais ou antrópicos (Ratcliffe, 1971; Smith & Theberge, 1986 *apud* Gimenes *et al.*, 2013). Segundo, Goldsmith (1983 *apud* Gimenes *et al.*, 2013), uma área é frágil devido a fatores intrínsecos do local, como por exemplo, uma área alagada, a fragilidade deste ambiente associada à interferências antrópicas que venham a ocorrer é a vulnerabilidade ambiental.

Gimenes & Augusto Filho (2013) desenvolveram metodologia para produzir mapas de fragilidade ambiental usando a análise multicritério conhecida como Análise Hierárquica de Processos (AHP), em que são integrados dados territoriais como: suscetibilidade à erosão, suscetibilidade à movimentos de massa, suscetibilidade à corrosividade, suscetibilidade ao escoamento superficial, suscetibilidade a eventos climáticos intensos, suscetibilidade à colapsividade e suscetibilidade dos fatores bióticos e socioeconômicos. Assim, para a análise da vulnerabilidade ambiental do presente estudo, serão integrados vários dados diferentes por meio de uma técnica para auxílio da tomada de decisão, a AHP, abordada no tópico 3.6.

3.2. EROSÃO

A erosão é um processo natural, também conhecido como erosão geológica, em que a remoção de partículas do solo acontece de maneira equilibrada e em longos períodos de tempo, e que vem modificando a crosta terrestre formando colinas suaves, planícies e vales ricos em nutrientes (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

Segundo Almeida Filho *et al.* (2015), historicamente a erosão é um fenômeno prejudicial em varias regiões que pode acarretar riscos elevados com danos econômicos, ambientais e

sociais. Pode ser definida como um grupo de processos que modificam a superfície terrestre, por meio da desagregação, decomposição ou remoção das condições originais de formação do solo (Da Silva, 1995) e, segundo definição em Bertoni & Lombardi Neto (2012) “erosão é um processo de desprendimento e de arraste acelerado das partículas de solo causado pela água e pelo vento”.

A erosão acarreta continuamente uma considerável perda de solo, no Brasil são estimados quinhentos milhões de toneladas de terra por ano, com redução da qualidade do solo devido à perda de nutrientes; redução na capacidade de infiltração e retenção de umidade; deposição de materiais em baixadas e reservatórios; e, redução do potencial produtivo da terra pelo desgaste do solo (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

A erosão é classificada em vários tipos como ilustrado na Figura 3.1, em que a erosão eólica acontece predominantemente em regiões áridas, semiáridas e em áreas em que a vegetação natural foi suprimida, em que a presença de ventos fortes faz com que o solo seja predominantemente solto, com pouca umidade e granulometria fina (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

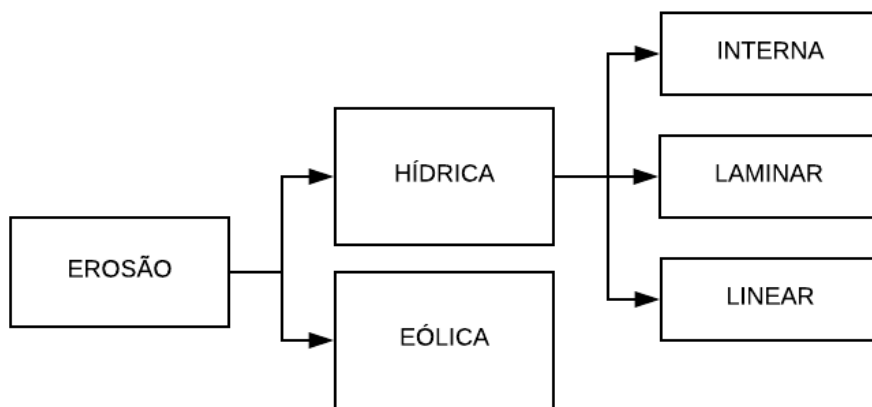


Figura 3.1: Tipos de erosão.

Os processos erosivos hídricos, causados pela ação da água da chuva, são os mais significativos e os que ocorrem com mais frequência no Brasil, e estão relacionados a diferentes aspectos como a geologia, o tipo de solo, a vegetação, a posição do lençol freático, e a geomorfologia (Macêdo, 2009). Segundo Lima *et al.* (2017), os processo erosivos hídricos dependem de dois aspectos: a erosividade, definida como a capacidade do agente erosivo causar a soltura e carregamento do solo e a erodibilidade, que caracteriza a resistência do solo ao processo erosivo, diretamente ligado as suas características físicas, em que o processo

erosivo acontece com o desprendimento do solo seguido do carreamento de suas partículas sólidas (Macêdo, 2009).

A erosão hídrica pode se manifestar na forma de erosão laminar, linear ou interna. 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). A erosão laminar, por sua vez, ocorre preferencialmente em áreas rurais, mas também pode ocorrer em áreas urbanas associadas à um planejamento deficiente do uso do solo e podem causar impactos socioeconômicos e ambientais consideráveis, como o assoreamento de corpos d'água (Lima *et al.*, 2017). Durante as chuvas o fluxo laminar da água acarreta a erosão laminar conforme sua velocidade, turbulência e carreamento de materiais abrasivos, ao desprender partículas de solo pela ação de forças horizontais, por correntes verticais ou pelo choque de outras partículas de solo (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

A erosão linear, segundo Macêdo (2009), é manifestada na forma de sulcos, ravinas ou voçorocas pela concentração de linhas de fluxo de escoamento superficial. A erosão em sulcos pode ser coexistente com a erosão laminar, é formado pelo carreamento de partículas de solo promovido pela concentração de um fluxo superficial e apresenta maiores risco de formação em áreas de maior declividade. A concentração de fluxo nos sulcos potencializa seu aprofundamento para erosões do tipo ravinas, visto o seu elevado potencial erosivo dado à energia cinética anexada ao fluxo.

As ravinas, então, são formadas a partir do agravamento do processo erosivo de um sulco, podendo adquirir proporções variáveis até chegar ao nível freático, transformando-se no último estágio do processo erosivo, na voçoroca (Lima *et al.*, 2017). As voçorocas acontecem em solos profundos e são marcadas pelo deslocamento de consideráveis massas de solo (Bertoni & Lombardi Neto, 2012), e de acordo com Macêdo (2009), o conhecimento das condicionantes dos processos erosivos é fator primordial para a previsão de processos erosivos. A seguir são apresentados modelos para a quantificação e qualificação dos processos erosivos inseridos na análise de vulnerabilidade ambiental.

3.3. MODELOS PARA ESTIMATIVA DE PERDA DE SOLO

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (2012), o uso de equações empíricas para estimar a perda de solo é uma prática indispensável, principalmente envolvendo o mercado da agricultura. As

equações de perda de solo foram desenvolvidas a partir de 1915 com o início dos estudos de quantificação de perda de solo desenvolvidos pelo Serviço Florestal dos Estados Unidos (Baptista,1997). Em 1940 foi desenvolvido o primeiro modelo que usa parâmetros topográficos para estimativa da perda de solo, a equação de Zingg, que relaciona o grau de declividade e os comprimentos de encostas com a perda de solo, e foi base para o desenvolvimento das EUPS por Wischmeier & Smith.

3.3.1. Equação Universal de Perda de Solo (EUPS)

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (2012), a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) foi desenvolvida na década de 1950 atendendo a problemática ligada aos modelos previamente desenvolvidos, em que a falta de parâmetros básicos para replicar o modelo em outras bacias hidrográficas não era possível. A Equação Universal de Perda de Solo foi atualizada por Wischmeier & Smith (1978) para a previsão da média anual de erosão laminar, permitindo auxiliar no planejamento do uso e ocupação do solo e até mesmo no Zoneamento Ecológico-Econômico (Crepani *et al.*, 2001).

A equação de Wischmeier & Smith (1978) é definida como:

$$A = R \cdot K \cdot L \cdot S \cdot C \cdot P \quad (3.1)$$

Em que,

“A” é a perda de solo por unidade de área, em ton/ha.ano;

“R” é o fator de erosividade da chuva, em (MJ.mm)/(ha. h. ano);

“K” é o fator de erodibilidade do solo, em (ton. h) / MJ. mm);

“L” é o fator de comprimento do declive (adimensional);

“S” é o fator de grau do declive, em % de declividade;

“C” é o fator de uso e manejo do solo (adimensional);

“P” é o fator de prática conservacionista (adimensional).

A EUPS é um modelo que apresenta limitações em previsões quantitativas de perdas de solo em grandes áreas, visto a simultaneidade dos processos de erosão laminar e de deposição de solo; todavia, é uma ferramenta adequada para avaliação qualitativa da susceptibilidade à erosão laminar. Segundo Baptista (1997), a utilização de técnicas de geoprocessamento para as análises em escala regional são facilitadores do método da EUPS em razão da dificuldade

em estimar as variáveis na forma tradicional, o que demandaria um extenso trabalho na execução de análises geotécnicas.

3.3.1.1. Fator de Erosividade da Chuva (R)

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (2012), o fator de erosividade da chuva representa o potencial erosivo da chuva, formado pela combinação do salpico das gotas de chuva com a turbulência e o carreamento do fluxo de água, ou seja, em que as perdas de solo são proporcionais à intensidade máxima da chuva em 30 minutos e sua energia cinética. Segundo os autores a melhor maneira de representar o fator da chuva na faixa intertropical é com o índice de erosão médio mensal, EI_{30} .

$$EI_{30} = 67,355 \cdot (r^2/P)^{0,85} \quad (3.2)$$

Em que,

“ EI_{30} ” média mensal do índice de erosividade, em (MJ.mm)/(ha.h);

“r” média do total mensal de precipitação, em mm;

“P” média do total anual de precipitação, em mm.

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_{30i} \quad (3.3)$$

No cálculo do fator R, índice de erosão médio anual para uma determinada localidade, somam-se os índices mensais, como indicado na equação 3.3, em que, $i = 1$ equivale à média do mês de janeiro e $i = 12$ à média do mês de dezembro (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

3.3.1.2. Fator de Erodibilidade do Solo (K)

A erodibilidade do solo está relacionada à suscetibilidade do solo a erosão laminar e é inversamente proporcional à velocidade de infiltração da água da chuva no solo, à permeabilidade do solo, à capacidade total de armazenamento de água e à resistência do solo às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte da chuva e escoamento (Bertoni & Lombardi Neto, 2012). Bertoni & Lombardi Neto estudaram o perfil de 66 solos do Estado de São Paulo adaptando o método de Middelton para uma metodologia adequada em solos tropicais. Por sua vez, baseado nesse estudo, Almeida *et al.*, 2012 apresentam os valores de erodibilidade do solo (fator k) citados na Tabela 3.1

Tabela 3.1: Valores de erodibilidade (fator k) (adaptado Almeida *et al.*, 2012).

Tipo de solo	Erodibilidade
<p>LEd1: Associação de LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO DISTRÓFICO ou ÁLICO, de textura muito argilosa, com LATOSSOLO VERMELHOAMARELO DISTRÓFICO, de textura muito argilosa ou argilosa, ambos presentes em relevo plano e suave ondulado.</p>	0,013
<p>LEd5: Associação de LATOSSOLO VERMELHO-ESCURO com LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, ambos DISTRÓFICOS de textura argilosa, presentes em relevo suave ondulado e plano. Pode também estar associado ao CAMBISSOLO DISTRÓFICO ou ÁLICO, de textura argilosa cascalhenta ou média cascalhenta, presente em relevo ondulado.</p>	0,014
<p>LVd2: Associação de LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO, de textura muito argilosa, presente em relevo plano e suave ondulado, com LATOSSOLO PETROPLÍNTICO, de textura muito argilosa cascalhenta de fase pedregosa ou endopedregosa, presente em relevo suave ondulado e plano, ambos DISTRÓFICOS.</p>	0,024
<p>LPd: Associação de LATOSSOLO PETROPLÍNTICO, de textura argilosa cascalhenta ou argilosa cascalhenta ou muito argilosa cascalhenta, em fase pedregosa ou endopedregosa, com LATOSSOLO VERMELHO AMARELO textura muito argilosa ou argilosa, ambos DISTRÓFICOS, presente em relevo suave ondulado e plano.</p>	0,035
<p>Cd3: Associação de CAMBISSOLO Tb, de textura média cascalhenta, com SOLOS LITÓLICOS de textura média muito cascalhenta, ambos DISTRÓFICOS, presente em relevo ondulado e forte ondulado.</p>	0,050
<p>Cd1: Associação de CAMBISSOLO DISTROFICO ou ALICO Tb, de textura média cascalhenta ou argilosa cascalhenta, presente em relevo ondulado e forte ondulado, com SOLOS LITÓLICOS DISTRÓFICOS, de textura média cascalhenta, presentes em relevo forte ondulado, ambos em fase pedregulhosa.</p>	0,050
<p>Rd1: Associação de SOLOS LITÓLICOS, de textura média cascalhenta, presente em relevo forte ondulado, com CAMBISSOLO Tb de textura argilosa cascalhenta, presente relevo ondulado e forte ondulado, ambos DISTRÓFICOS.</p>	0,055

3.3.1.3. Fator de Comprimento de Rampa e Grau de Declive (LS)

O comprimento de rampa e o grau de declividade de uma localidade afeta a intensidade da erosão hídrica e são considerados conjuntamente como um único fator topográfico, o fator LS (Bertoni & Lombardi Neto, 2012). O fator LS pode ser calculado pela seguinte equação:

$$LS = \frac{\sqrt{L}}{100} \cdot (1,36 + 0,97 S + 0,1385 S^2) \quad (3.4)$$

Em que,

“LS” é a relação de perda de solo por unidade de área em um declive qualquer;

“L” o declive em metro;

“S” é o grau do declive em porcentagem.

Bertoni & Lombardi Neto (2012) adaptaram a equação do cálculo do fator LS, com base em estudo de declives de Campinas - SP, tornando-a mais relacionada aos solos tropicais, em que o fator LS pode ser calculado pela seguinte equação:

$$LS = 0,00984 \cdot C^{0,63} \cdot D^{1,18} \quad (3.5)$$

Em que,

“C” Comprimento de rampa em metros;

“D” Grau de declive em porcentagem.

Para a presente pesquisa utilizou-se o método de Moore & Burch (1986), em que o fator LS pode ser obtido pela equação 3.6.

$$LS = \left(\frac{FA \times CellSize}{22,13} \right)^{0,4} \times \left(\frac{\sin(slope)}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (3.6)$$

Em que,

“FA” é fluxo acumulado de determinada área de contribuição

“CellSize” é o tamanho da célula do modelo numérico de terreno usado para produção do FA.

“Slope” é a declividade calculada para cada pixel em radianos.

3.3.1.4. Fator de Uso e Manejo do Solo (C)

O fator de uso e manejo do solo (fator C) está relacionado com a perda de solo para determinado tipo de cultivo em comparação com terrenos mantidos continuamente descobertos, levando em consideração a redução de perda de solo ocasionada pelas culturas agrícolas. O fator C mede o efeito combinado do tipo de preparo do solo, da efetividade do manejo dos restos culturais e da proteção acarretada pelo tipo de cultura, que por sua vez depende do tipo de vegetação e o nível de desenvolvimento (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

3.3.1.5. Fator de Prática Conservacionista (P)

O fator de prática conservacionista (fator P) está relacionado ao grau de perda de solo com determinadas práticas conservacionistas, como, plantio morro abaixo, plantio em contorno, alternância de campinas e cordões de vegetação permanente (Bertoni & Lombardi Neto, 2012).

São encontrados valores tabelados para os fatores C e P associados às classe temáticas de uso e cobertura do solo, como os atribuídos por Almeida *et al.* (2012) apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Fatores C e P para classes de uso e cobertura do solo (adaptado Almeida *et al.*, 2012).

Classes Temáticas	Fator C	Fator P
Corpos d'água	0,00	0,00
Culturas agrícolas	0,135	0,10
Mata Galeria	0,03	0,03
Pastagem	0,09	0,10
Solos expostos	0,20	0,20
Áreas urbanizadas (loteamentos)	0,00	0,00
Cerrado	0,01	0,02

3.3.2. Modelo Qualitativo Baseado em Geoindicadores para Avaliação da Erosão Linear

Campagnoli (2002, *apud* Macedo, 2009) propôs uma metodologia para avaliação da erosão linear para mapeamento das áreas de produção de sedimentos do território brasileiro, baseada em fatores de suscetibilidade à erosão linear, como os mecanismos e condicionantes de relevo, o tipo de solo e o substrato geológico.

Nessa metodologia, a classificação quanto à suscetibilidade a erosão linear é baseada na textura e na espessura dos solos, em que solos rasos são classificados com baixo potencial à erosão linear pela proximidade do substrato rochoso com a superfície, ao contrário de solos profundos. A metodologia de Campagnoli (2002) também classifica as unidades geológicas com base na estrutura das rochas e da litologia, em que quanto mais permeável e maior o volume de vazios do solo, maior o seu potencial erosivo. O potencial erosivo também aumenta com o aumento da declividade do terreno. Na Tabela 3.3 estão expressos graus de vulnerabilidade de rochas mais comuns que serão usadas como auxílio para classificação das unidades geológicas na área de estudo.

Tabela 3.3: Escala de vulnerabilidade à erosão e intemperismo de rochas (Crepani *et al.*, 2001)

Escala de vulnerabilidade à denudação das rochas mais comuns					
Quartzitos ou meta-arenitos	1,0	Milonitos, Quartzo muscovita, Biotita, Clorita xisto	1,7	Arenitos quartzosos ou ortoquartzitos	2,4
Riolito, Granito, Dacito	1,1	Piroxenito, Anfíbolito, Kimberlito, Dunito	1,8	Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulito	1,2	Hornblenda, Tremolita, Actinolita xisto	1,9	Grauvacas, Arcózios	2,6
Migmatito, Gnaiss	1,3	Eutauroлита xisto, Xistos granatíferos	2,0	Siltitos, Argilitos	2,7
Nefelina-Sienito	1,4	Filito, Metassiltito	2,1	Folhelhos	2,8
Andesito, Diorito. Basalto	1,5	Ardósia, Metargilito	2,2	Calcários, Dolomitos, Margas, Evaporitos	2,9
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6	Mármore	2,3	Sedimentos Inconsolidados: Aluviões, Colúvios etc.	3,0

Na primeira etapa da sua metodologia, Macedo (2009) adaptou a de Campagnoli (2002) e fez a classificação das unidades geológicas e pedológicas, em classes: I- Baixo Potencial, II- Médio-baixo Potencial, III- Médio-alto Potencial, IV- Alto Potencial, V- Muito Alto. As

unidades pedológicas como solos argilosos rasos foram classificadas como I e solos arenosos profundos como V, o mesmo para as unidades geológicas. Após a classificação foi feito um cruzamento matricial para obtenção de um mapa geopedológico, segundo os atributos da Tabela 3.4

Tabela 3.4: Atributos para cruzamento dos mapas de pedologia e geomorfologia (Adaptado de Campagnoli, 2002).

Unidades Pedológicas	Unidades Geomorfológicas					
	I	II	III	IV	V	
I	I	I	I	II	III	
II	I	II	II	III	III	
III	I	II	III	III	III	
IV	II	III	III	IV	IV	

Na segunda etapa da metodologia de Macedo (2009) foi reclassificado o mapa de declividades e realizado um novo cruzamento matricial com o mapa de geopedologia, segundo os atributos descritos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Atributos para cruzamento do mapa geopedológico e de declividade (Adaptado de Campagnoli, 2002).

Unidades Geopedológicas	Declividade (%)				
	I (0-6)	II (6-12)	III (12-20)	IV (20-30)	V (>30)
I	I	I	I	II	II
II	I	I	II	III	III
III	I	II	II	III	V
IV	II	II	III	IV	V
V	II	III	IV	V	V

Na etapa 1, Almeida *et al.* (2012) propuseram uma classificação das zonas homólogas, devido os mapas de pedologia e geomorfologia possuírem escalas pequenas, e não representam peculiaridades cartográficas importantes para o diagnóstico de processos erosivos. A identificação das zonas homólogas permite uma melhor adequação em função do relevo da paisagem local. As zonas homólogas foram identificadas e classificadas como: fundo de vale, vertentes, escarpa, platô e crista de relevo segundo os critérios de fotointerpretação de Brink

et al. (1966, apud Almeida *et al.*, 2012). A Figura 3.2 apresenta os critérios de avaliação do terreno a partir da esquematização das zonas homólogas em um relevo terrestre.

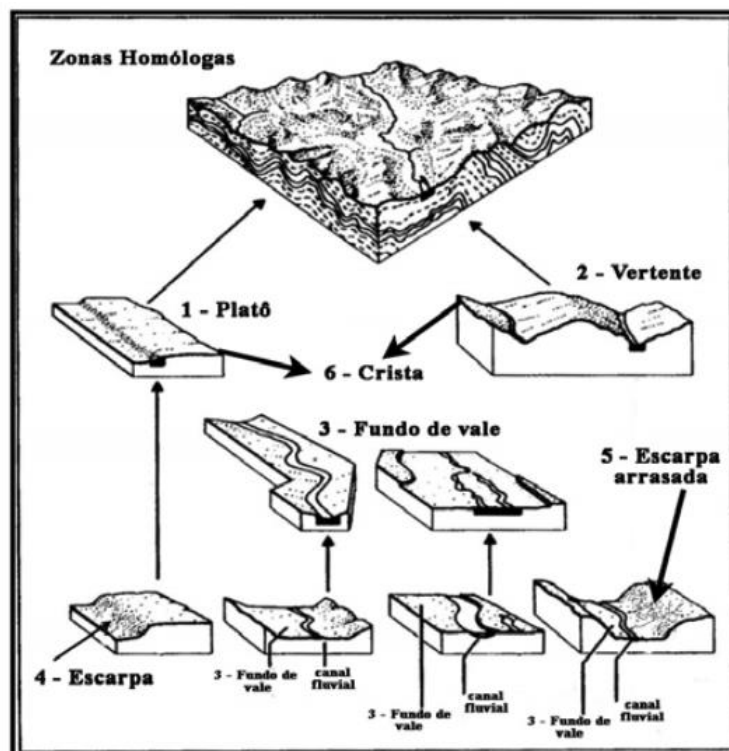


Figura 3.2: Técnica de avaliação do terreno por zonas homólogas de (Brink *et al.*, 1966, apud Almeida *et al.*, 2012).

Para solução dos modelos acima e obtenção dos fatores da EUPS são utilizadas operações como cruzamentos matriciais presentes na álgebra de mapas, inseridas em algoritmos de geoprocessamento de Sistema de Informação Geográfica (SIG), abordados a seguir.

3.4. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS (SIG)

A definição de sistema de informações geográfica se enquadra dentro do conceito de geoprocessamento, tecnologia computacional que coleta, armazena, recupera, manipula, visualiza e analisa dados georreferenciados a um sistema de coordenadas geográficas, com objetivo de integrar e analisar dados em análises espaciais territoriais (Burrough & McDonnell, 2015; Rocha, 2010 *apud* Fitz, 2008).

A ciência geográfica busca um entendimento de uma complexa rede de integração dos fenômenos sociais e ambientais, e o SIG aplica-se nessa compreensão permitindo a integração de uma ampla gama de conhecimentos e aplicações mais complexas que os sistemas de *Computer Aided Design* (CAD) (Fitz, 2008). Um caso prático foi a migração de dados de cadastro em formato CAD da CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito

Federal) para banco de dados geográficos no ambiente de um SIG, permitindo o refinamento de seus dados, e maior acesso a base de dados para uma gestão mais rápida e integrada com outros setores (Leonardi, 2013).

As aplicações de um SIG, segundo Fitz (2008), permitem trabalhar com dados climáticos, socioeconômicos e geográficos vinculados ao espaço físico. No âmbito do planejamento urbano, um SIG permite aplicações com mapeamentos de uso do solo, zoneamentos, monitoramento de áreas de risco e de proteção ambiental, estruturação de redes de energia, água e esgoto, adequação tarifária de impostos, estudo e modelagem de expansão urbana, controle de ocupações e construções irregulares, estabelecimento de modalidades de transporte.

Segundo Câmara (1995), há três maneiras de utilizar um SIG: como ferramenta para produção de mapas temáticos, como suporte para análise espacial de fenômenos e como um banco de dados geográficos. O desenvolvimento de novas tecnologias além de disponibilidade de novas técnicas de análise espacial e integração de algoritmos matemáticos facilita o uso das tecnologias SIG em um meio multidisciplinar como o estudo de vulnerabilidade ambiental.

3.5. USO E COBERTURA DO SOLO

O estudo do uso e cobertura do solo é fundamental para a presente pesquisa, visto que a ação antrópica no meio é um dos fatores mais agravantes aos processos erosivos. O estudo do uso e cobertura do solo é muito difundido por técnicas de sensoriamento remoto com SIG, que segundo Fitz (2008), utilizam sensores remotos em plataformas aéreas e/ou orbitais ao invés do contato físico direto, para captação da energia da radiação eletromagnética absorvida ou refletida pela superfície da Terra.

Os mapas de uso e cobertura de solo são gerados a partir de imagens obtidas por levantamentos aerofotogramétricos ou espaciais, com sensores instalados em satélites orbitais, em aeronaves ou em veículos aéreos não tripulados (Fitz, 2008). Dentre os satélites mais conhecidos estão o Landsat, Cbers, Ikonos, Spot, Quick Bird, Sentinel que apresentam imagens com diferentes resoluções temporais, espaciais e espectrais.

A partir das imagens digitais da superfície terrestre são usadas técnicas de fotointerpretação para produzir mapas temáticos com o uso e cobertura do solo, inseridas em algoritmos de processamento digital, algoritmos esses que podem ser divididos em pré-processamento, técnicas de realce e classificação temática (Fitz, 2008). O pré-processamento envolve o

procedimento inicial de tratamento das imagens e geralmente envolve a calibração radiométrica, a correção de distorções e a remoção de ruído. Na etapa de realce de contraste são utilizadas funções matemáticas denominadas transformações radiométricas, expandindo o intervalo original de níveis de cinza de uma imagem, aumentando assim o contraste e a qualidade da imagem (INPE, 2010).

Na classificação temática de imagens são atribuídas classes por meio de diferentes métodos como os de *pixel por pixel*, que utilizam informações expectais de cada pixel para localizar regiões homogêneas, e os classificadores por regiões, que além das informações expectais do *pixel*, procura simular o comportamento dos *pixels* vizinhos e outras características espaciais na busca por regiões homogêneas (INPE, 2010). Para realização da classificação das imagens é necessário um reconhecimento da assinatura espectral das classes, conhecido como técnica de treinamento. No treinamento supervisionado a imagem dispõe de informações que permitam um reconhecimento de classes temáticas representativas para cada área de interesse pelo usuário, já o não supervisionado utiliza algoritmos para reconhecer automaticamente as classes temáticas presentes na imagem (INPE, 2010).

A segmentação de imagens de sensores remotos por vezes precede os métodos de classificação temática, e consiste na divisão em grupos de pixels que apresentem uniformidade nos seus valores expectais e que se distribuam bidireccionalmente (INPE, 2010). A etapa de segmentação pode ser acrescida de uma correção visual de eventuais falhas na segmentação, ou refinamento do resultado.

3.6. ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

O método da Análise Hierárquica de Processos (AHP), proposto por Thomas Saaty (1980) é uma importante ferramenta de suporte à tomada de decisões, pois, segundo Lambert Torres *et al.* (2007) a AHP é uma modelagem similar a realizada pela mente humana, visto que agrupa elementos de uma situação complexa de acordo com propriedades comuns que convergem para um objetivo decisório estabelecendo decisões de ordem em comparações formadas por pares de elementos.

A Análise Hierárquica de Processos de Saaty (1980) apresenta como elementos fundamentais: os critérios que são conjuntos finitos de alternativas para análise do objetivo principal, a hierarquia que é o ordenamento a nível hierárquico do conjunto de critérios, as comparações paritárias que são a comparação de alternativas usando determinado critério indicativo da

preferencia de uma alternativa a outra e, por último a escala fundamental que permite associar as alternativas em grau de importância.

É possível a produção de um mapa de vulnerabilidade ambiental a partir dos critérios relacionados às variáveis ambientais para o Algoritmo da AHP, como a suscetibilidade a processos erosivos laminares e lineares, a suscetibilidade à ação antrópica e a suscetibilidade à inundação.

A Tabela 3.6, representa a escala fundamental para comparação pareada (Saaty, 1980) utilizada como pesos em uma AHP, em que o valor “9” indica uma extrema importância ou superioridade e seu valor inverso “1/9” indica uma extrema inferioridade. Os valores 2, 4, 6, 8 são valores intermediários nessa escala.

Tabela 3.6: Escala Fundamental proposta por Thomas Saaty (1980) para 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

O algoritmo AHP é baseado na lógica *fuzzy*, uma ferramenta de suporte para análise multicritérios, que diferente das análises binárias que atribuem apenas valores binários (0 ou 1), permite a atribuição de pesos para cada parâmetro permitindo análises mais confiáveis e condizentes com a realidade.

Saaty (1991) estabeleceu uma verificação da razão de consistência (RC) para verificar se os valores não estão distribuídos de forma aleatória, visto que o estabelecimento de pesos está

anexado a um caráter subjetivo do julgador. A razão de consistência tem limite máximo de aceitação de 0,10.

3.7. ENCHENTES E INUNDAÇÃO

Segundo o glossário da Defesa Civil (De Castro, 1998) enchentes são elevações temporárias do nível d'água em rios ou lagos, em um processo natural causado por precipitações pluviométricas em que o canal fluvial ocupa seu leito maior (Tucci, 2007), como ilustrado na Figura 3.3, em que a inundação   consequência de enchentes quando há interferência antrópica, como impermeabiliza o do solo, acumula o de águas por drenagem deficiente, assoreamento do leito do rio, rompimento de barragens, entre outros.

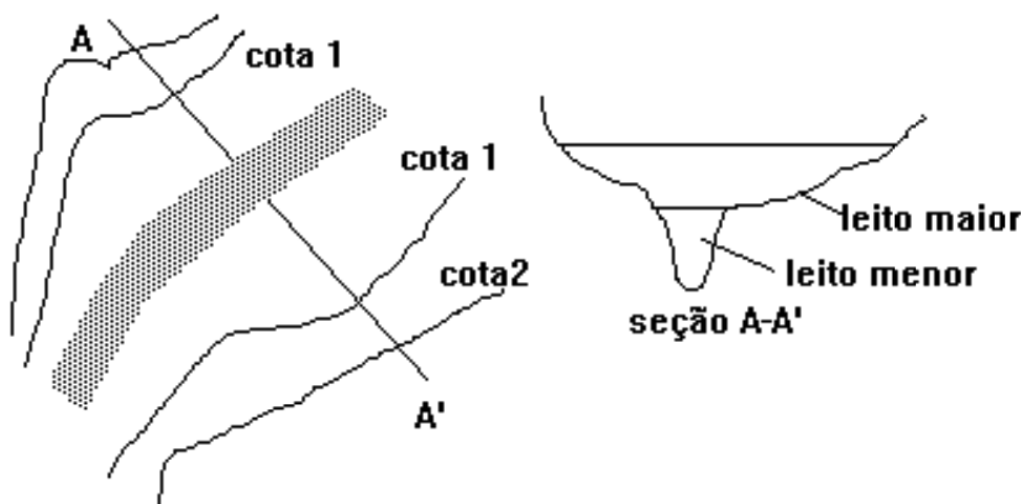


Figura 3.3: Representa o da planície de inunda o de um rio (Tucci, 2007).

Segundo Tucci (2007), as enchentes são um problema recorrente no Brasil, visto que a maior parte das cidades não existe um Plano Diretor Urbano que estabeleça restri oes ao loteamento em áreas de risco a inunda o. Com a urbaniza o ocorre   impermeabiliza o do solo, aumentando o escoamento superficial de uma  gua que outrora infiltrava no solo, exigindo maior capacidade de escoamento das se oes de drenagem que, em geral, não são observadas exigências por parte de órgãos governamentais para eficiência de sistemas de drenagem adequados. Quando a urbaniza o não   controlada ou há amplia o da capacidade de drenagem acarreta a ocorrência de enchentes com consideráveis perdas sociais, naturais e econ micas.

Para a análise da vulnerabilidade ambiental desta pesquisa, a suscetibilidade   inunda o   uma variável a ser analisada, em que existem métodos para avaliar essa suscetibilidade com o

uso de parâmetros topográficos de terreno e *buffers* de drenagem, como no trabalho de Almeida *et al.* (2017) que avaliaram a vulnerabilidade ambiental da bacia do Ribeirão Sarandi. Para a presente pesquisa foi usado o método de Vem Te Chow para estimar as vazões máximas de projeto, principal subsídio para o modelo hidráulico do HEC-RAS que delimita a zona inundada por meio do levantamento topográfico de uma série de secções transversais ao longo do corpo d'água em estudo (Fernandez *et al.*, 2013), abordados nos próximos tópicos.

3.8. MÉTODO VEM TE CHOW

O método de Vem Te Chow é um modelo hidrológico para transformações dos dados de chuva em dados de vazão, por meio de equações lineares, estimando as vazões de projeto que são proporcionais as chuvas excedentes (Chow, 1988 *apud* Nunes *et al.*, 2007). O modelo é apropriado principalmente na ausência de séries fluviométricas, como ocorre na área de estudo. A vazão máxima é calculada pela Equação 3.7.

$$Q = A.X.Y.Z/3,6 \quad (3.7)$$

Em que,

“Q” vazão máxima (m³/s);

“A” área da bacia de estudo;

“X” fator de deflúvio, razão da precipitação excedente (Re) pelo tempo de duração (t_d);

“Y” fator climático, igual a 1 visto que foi usada a equação IDF elaborada para o Distrito Federal;

“Z” fator de redução do tempo de pico;

Para transformação de chuva-deflúvio, é calculada a precipitação efetiva, ou seja, que irá transforma-se em escoamento superficial, necessário para o cálculo do fator de deflúvio (X). A obtenção da precipitação efetiva é feita pela expressão do *Soil Conservation Service* (Paiva, 2003, *apud* Correia *et al.*, 2016):

$$Re = \frac{(R - 0,2S)^2}{(R + 0,8S)} \quad (3.8)$$

Em que,

“Re” escoamento superficial direto, ou seja que não infiltra no solo, em (mm);

“R” precipitação, em (mm), equivalente ao valor de I_m calculado na equação I-D-F, multiplicado pelo tempo de duração da chuva;

“S” retenção potencial do solo, em (mm).

O fator S, retenção potencial do solo, complemento do cálculo da equação 3.8, é um estimativa de capacidade de infiltração máxima do solo, proposto por Paiva (2003, apud Correia *et al*,2016), calculado por meio da expressão:

$$S = -254 + 25400/CN \quad (3.9)$$

Em que,

“S” retenção do potencial do solo, em (mm);

“CN” valor da curva número em função grupo de solo, umidade antecedente e uso e ocupação do solo (adimensional).

O valor de CN é determinado a partir das condições de uso e ocupação do solo e das características do solo da área, os valores próximos a 100 indicam maior escoamento superficial. Os CN são encontrados na bibliografia, como indicado nas Tabelas 3.7 e 3.8.

Tabela 3.7: Valores dos números CN para bacias rurais (Tucci, 2009).

Uso do Solo	Superfície	A	B	C	D
Solo lavrado	Com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	Em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações Regulares	Em curvas de níveis	67	77	83	87
	Terraceamento em nível	64	76	84	88
	Em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	Em curvas de níveis	62	74	82	85
	Terraceamento em nível	60	71	79	82
	Em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes ou cultivados	Em curvas de níveis	60	72	81	84
	Terraceamento em nível	57	70	78	89

	Pobre	68	79	86	89
	Normal	49	69	79	94
	Boa	39	61	74	80
Pastagem em curva de nível	Pobre	47	67	81	88
	Normal	25	59	75	83
	Boa	6	35	70	79
Campos permanentes	Normal	30	58	71	78
	Esparsa, de baixa transpiração	45	66	77	83
	Normal	36	60	73	79
	Densa, de alta transpiração	25	55	70	77
Chácaras/ estradas de terra	Normal	56	75	86	91
	Ruim	72	82	87	89
	De superfície dura	74	84	90	92
Floresta	Muito esparsa, baixa transpiração	56	75	86	91
	Esparsa	46	68	78	84
	Densa, alta transpiração	26	52	62	69
	Normal	36	60	70	76

Tabela 3.8: Valores dos números CN para bacias urbanas e suburbanas (Tucci, 2009).

Uso do Solo		A	B	C	D
Zonas cultivadas: sem conservação do solo		72	81	88	91
Zonas cultivadas: com conservação do solo		62	71	78	81
Pastagens ou terrenos em más condições		68	79	86	89
Baldios em boas condições		39	61	74	80
Prado em boas condições		30	58	71	78
Bosques ou zonas com cobertura ruim		45	66	77	83
Floresta: cobertura boa		25	55	70	77
Espaços abertos, parques, campos de golfe em boas condições.	Com relva em mais de 75% da área	39	61	74	80
	Com relva de 50 a 75% da área	49	69	79	84
Zonas comerciais e de escritórios		89	92	94	95
Zonas industriais		81	88	91	93

	Lotes de (m ²)	% média impermeável				
Zonas residenciais	< 500	65	77	85	90	92
	1000	38	61	75	83	87
	1300	30	57	72	81	86
	2000	25	54	70	80	85
	4000	20	51	68	79	84
Parques de estacionamentos, telhados, viadutos e etc			98	98	98	98
Arruamentos e estradas	Asfaltadas e com drenagem pluvial		98	98	98	98
	Paralelepípedos		76	85	89	91
	Terra		72	82	87	89

Segundo Tucci (2009), os solos tipo A produzem baixo escoamento superficial e alta infiltração, como solos arenosos profundos com pouco silte e argila; os solos tipo B são solos menos permeáveis que o tipo anterior, como solos arenosos menos profundos e permeabilidade superior a média; os solos tipo C são solos que geram escoamento superficial acima da média, contendo percentagem considerável de argila e pouco profundo; e, os solos tipo D são solos pouco profundos que contém argilas expansivas, gerando maior proporção ao escoamento superficial que a infiltração.

A intensidade da chuva (I_m) será obtida por meio da equação I-D-F para Brasília (NOVACAP, 2005), cálculo que é realizado para um determinado tempo de retorno. A equação intensidade-duração-frequência (I-D-F) é construída a partir análises estatísticas de registros históricos de estações pluviométricas da região, e são ideias para metodologias em que seja necessária a desagregação de chuvas para obter durações parciais (Tucci, 2009).

$$I_m = \frac{1574,7 \cdot T_r^{0,207}}{(t + 11)^{0,884}} \quad (3.9)$$

Em que,

“ I_m ” intensidade máxima da chuva (mm/h);

“ T_r ” tempo de retorno (anos);

“ t_d ” tempo de duração da chuva (minutos).

O fator de redução de pico (Z) foi determinado por Wilken (1971), pela análise de 20 bacias de pequena escala dos Estados Unidos, por meio de uma correlação entre o tempo de duração da chuva (t_d) e o tempo de pico da vazão em horas (t_p). O valor do tempo de pico (t_p) é determinado por meio de uma correlação do comprimento e da declividade do curso d'água, expresso na equação 3.10.

$$t_p = 0,005055 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,64} \quad (3.10)$$

Em que,

“ t_p ” tempo de pico da vazão (horas);

“ L ” comprimento do curso d'água principal, em linha reta;

“ I ” declividade média do curso d'água (%).

Os valores do fator de redução do tempo de pico de vazão (Z) correlacionado com a razão entre o tempo de duração da chuva (t_d) e o tempo de pico da vazão em horas (t_p), estão na tabela 3.9.

Tabela 3.9: Valores de Z correlacionados com a relação t_d/t_p . (Wilken, 1971).

t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z
0,05	0,04	0,46	0,36	0,84	0,58	1,22	0,75	1,6	0,90
0,1	0,08	0,48	0,38	0,86	0,59	1,24	0,76	1,62	0,90
0,12	0,10	0,5	0,39	0,88	0,50	1,26	0,77	1,64	0,91
0,14	0,12	0,52	0,40	0,9	0,60	1,28	0,78	1,66	0,91
0,16	0,14	0,54	0,41	0,92	0,61	1,3	0,79	1,68	0,92
0,18	0,16	0,56	0,42	0,94	0,62	1,32	0,80	1,7	0,92
0,2	0,18	0,58	0,44	0,96	0,63	1,34	0,81	1,72	0,93
0,22	0,19	0,6	0,45	0,98	0,64	1,36	0,82	1,74	0,93
0,24	0,20	0,62	0,46	1,00	0,65	1,38	0,82	1,76	0,94
0,26	0,22	0,64	0,47	1,02	0,66	1,4	0,82	1,78	0,94
0,28	0,24	0,66	0,48	1,04	0,67	1,42	0,83	1,8	0,95
0,3	0,25	0,68	0,49	1,06	0,68	1,44	0,84	1,82	0,95
0,32	0,26	0,7	0,50	1,08	0,69	1,46	0,85	1,84	0,96
0,34	0,28	0,72	0,51	1,1	0,70	1,48	0,86	1,86	0,96

t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z	t_d/t_p	Z
0,36	0,29	0,74	0,52	1,12	0,71	1,5	0,86	1,88	0,97
0,38	0,30	0,76	0,54	1,14	0,72	1,52	0,87	1,9	0,97
0,4	0,32	0,78	0,55	1,16	0,73	1,54	0,88	1,92	0,98
0,42	0,33	0,8	0,56	1,18	0,74	1,56	0,88	1,94	0,98
0,44	0,34	0,82	0,57	1,2	0,74	1,58	0,89	1,96	0,99

No trabalho acadêmico de Fernandez *et al.*(2013) para a comparação de modelos para delimitação de zonas inundáveis, o HEC-HMS foi aplicado o hietograma de precipitação total para o cálculo do hidrograma de cheias em eventos de precipitação, calculado em função da infiltração e da retenção superficial na bacia hidrográfica. Com o hidrograma calculado pelo modelo HEC-HMS é possível usando o modelo hidrológico HEC-RAS calcular as áreas passíveis de inundação para a análise da vulnerabilidade ambiental, assim como a vazão de projeto calculada pelo modelo é possível calcular as áreas de inundação com o software HEC-RAS.

3.9. MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS

O modelo hidráulico HEC-RAS desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers (USACE)*, é um modelo uni-dimencional que pelo método de diferenças finitas resolve as equações de Saint-Venant, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e variável para a delimitação de zonas inundáveis por eventos de precipitação (USACE, 2008 apud Fernandez, 2013).

O modelo hidráulico delimita as zonas inundáveis por meio da simulação do escoamento em canais, nas margens e nas adjacências do curso d'água possibilitando a definição dos níveis das planícies de inundação em um processo interativo denominado *Standard Step Method*, em que os perfis da linha d'água são computados pela seguinte expressão (USACE, 2008 apud Correia *et al*, 2016):

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \quad (3.11)$$

Em que,

“Z₁” e “Z₂” Elevação da linha d'água nas seções S1 e S2

“Y₁” e “Y₂” Velocidades médias nas seções S1 e S2

“ V_1 ” e “ V_2 ” Velocidade média nas seções

“ α_1 ” e “ α_2 ” Coeficiente de velocidade

“g” aceleração da gravidade

Para esse modelo é necessário a utilização dos coeficientes de *Manning*, que representam a rugosidade do canal e da planície de inundação em função da cobertura do solo, além de adotar que o regime de escoamento permanente, com fluxo unidimensional, declividade constante entre duas seções transversais e inferiores a 1:10, escoamento gradualmente variado com exceção em estrutura como pontes e vertedores (USACE, 2008 apud Correia *et al*, 2016). Na Tabela 3.10 se encontram os coeficientes de rugosidade de Manning para arroios e rios, valores próprios para projetos (Porto, 2006).

Tabela 3.10: Valores do coeficiente de rugosidade da fórmula de Manning (Porto, 2006)

Condição de contorno de arroios e rios	Condição			
	Muito Boa	Boa	Regular	Má
1. Limpos, retilíneos e uniformes.	0,025	0,028	0,030	0,033
2. Como em 1 porém com vegetação e pedras.	0,030	0,033	0,035	0,040
3. Com meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos.	0,035	0,040	0,045	0,050
4. Como em 3, águas baixas, declividade fraca.	0,040	0,045	0,050	0,055
5. Como em 3, com vegetação e pedras.	0,033	0,035	0,040	0,045
6. Como em 4, com pedras.	0,045	0,050	0,055	0,060
7. Com margens espreiadas, pouca vegetação.	0,050	0,060	0,070	0,080
8. Com margens espreiada, muita vegetação.	0,075	0,100	0,125	0,150

O HEC-RAS permite integração com ambiente SIG com o software HEC-GeoRAS, para visualização e produção de mapas temáticos com as áreas e alturas de inundação, importantes para a análise da vulnerabilidade ambiental. A inundação é agravada em condições em que a

infiltração natural no solo seja reduzida, o que acontecem em vários tipos de uso de solo relacionados à atividades antrópicas.

3.10. AÇÃO ANTRÓPICA

As ações antrópicas, para a presente pesquisa, são as alterações realizadas pelo homem no ambiente que convive, como cortes das encostas aterros, depósitos de lixo, retirada da cobertura vegetal, modificações na drenagem que, segundo Kaiser *et al* (2017) propiciam novas relações com os fatores geológicos e pedológicos naturais, resultando no aumento de deslizamentos de terra, perda de solo, intensidade das inundações, principalmente em áreas com o relevo acidentado ou regiões serranas.

O fenômeno da urbanização, muitas vezes acontece sem o estabelecimento de diretrizes prévias de implantação, sem planejamento e de maneira irregular, principalmente entre a classe média baixa e em áreas muitas vezes desfavoráveis, devido ao relevo, como áreas de encostas, áreas de proteção permanente (Bimbi, 2004 *apud* Kaiser *et al*, 2017). Com a somatória dessas condições, ação antrópica em áreas impróprias e sem as devidas condições de planejamento o ambiente é mais propício a processos de alteração e degradação da paisagem.

Nessa pesquisa será analisada a combinação das áreas em que há ação antrópica e áreas que apresentem fragilidade ambiental, para analisar a vulnerabilidade quando há exposição à ação antrópica.

4) MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Softwares

Para desenvolvimento da pesquisa foram utilizados os sistemas de informações geográficas, ArcGIS 10.6, SPRING 5.5.4 e o software Google Earth para produção dos mapas temáticos de uso e cobertura do solo, e operações matriciais necessárias para gerar os mapas de susceptibilidade às ações antrópicas, erosão linear e laminar, o mapa de áreas inundáveis e, por fim, a geração do mapa de vulnerabilidade ambiental. Foi usado os *software* HEC-RAS para modelagem hidráulica necessária para a delimitação das áreas suscetíveis à inundação.

4.1.2. Imagens

Na Tabela 4.1 estão listadas as imagens de sensores remotos que serão utilizados na pesquisa, com sua respectiva datas e resoluções espaciais. As imagens dos satélites Landsat 5, Landsat 8 e RapidEye para o ano de 2011 foram registradas ao longo do mês de setembro, mas a imagem do satélite RapidEye do ano de 2014 foi registrada no mês de abril devido a inexistência de imagens estação de seca para este ano.

Tabela 4.1: Imagens de sensores remotos utilizadas.

Satélite/ Tipo de Dado	Data (ano)	Resolução Espacial (metros)	Fonte
RapidEye	2011, 2014	5	Ministério do Meio Ambiente
Landsat 5	2000	30	NASA/USGS
Landsat 8	2018	30 nas bandas Multispectral 15 as bandas pancromáticas	NASA/USGS

4.1.3. Base cartográfica

Para o estudo foram utilizados os mapas de pedologia, em escala 1:100.000, fornecido pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA) e de geologia, em escala

1:250.000, fornecido pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), ilustrados na Figura 4.1, além de mapas temáticos digitais disponíveis na Base Cartográfica do Distrito Federal (Geoportal/SEGETH) como hidrografia, relevo em curvas de nível, limites administrativos e regionais, Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT), situação fundiária.

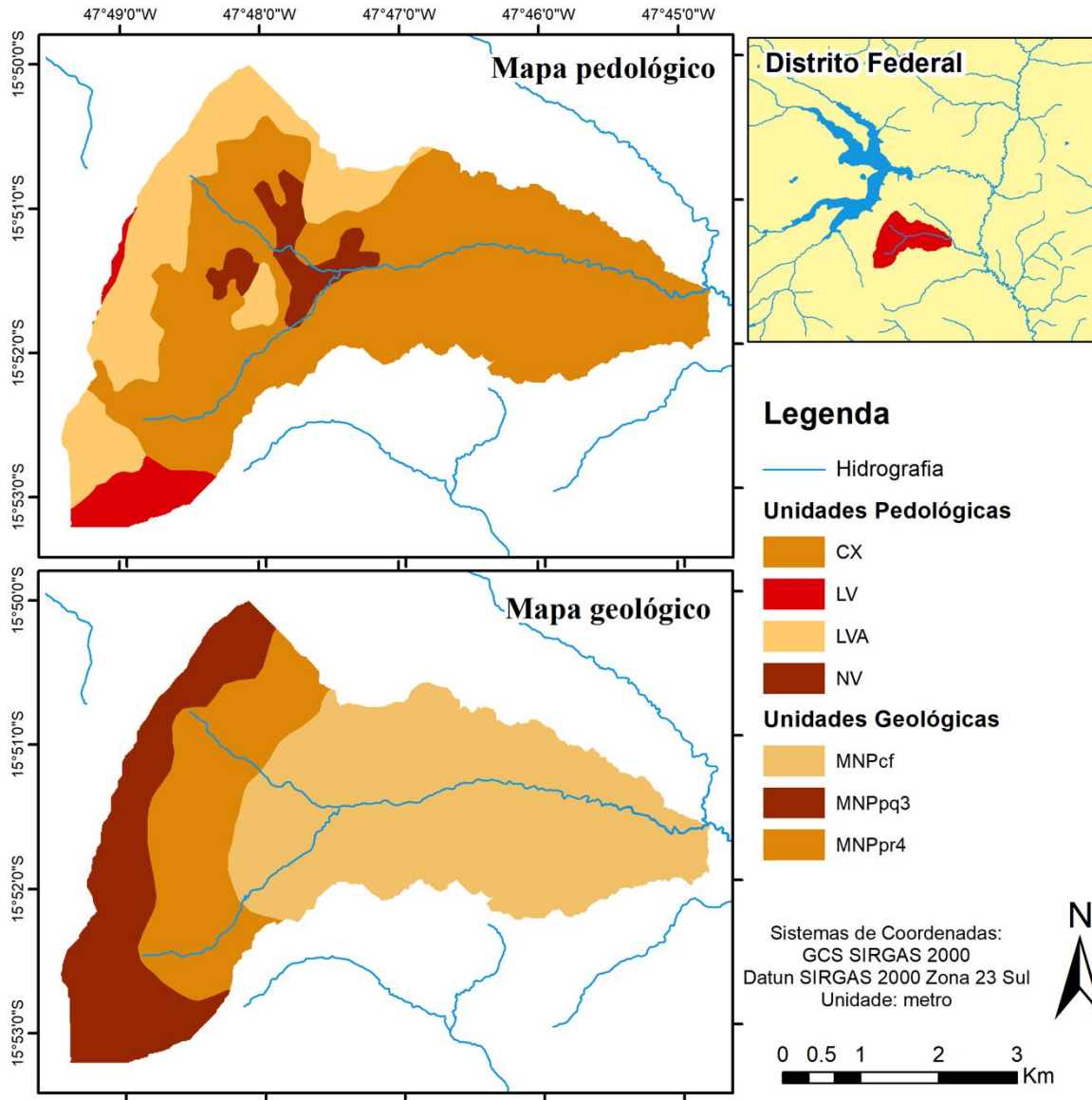


Figura 4.1: Mapas temáticos de pedologia e geologia utilizados na pesquisa.

Sobre as classes pedológicas da região, segundo a descrição do Manual de Pedologia do Distrito Federal (EMBRAPA, 2004):

CX (Cambissolo Háplico), textura sílico-argilosa, argilosa comumente cascalhenta, relevo ondulado a fortemente ondulado, normalmente solos são rasos.

LVA (Latossolo Vermelho Amarelo), textura argilosa média ou arenosa, relevo plano a suave ondulado distrófico, profundo a muito profundo, com estrutura granular média.

NV (Nitossolo Vermelho), também conhecida com Terra Rocha Estruturada, textura argilosa a muito argilosa, estruturação granular comum, derivados de rochas basálticas, geralmente associadas a relevo fortemente ondulado, diminuição de condutividade em profundidade.

LV (Latossolo Vermelho), textura argilosa a muito argilosa, distrófico, relevo plano a suave ondulado, profundo a muito profundo, com estrutura granular.

Para análise do valor de erosividade da chuva foram usados os dados de sete (7) estações pluviométricas, obtidas pelo HIDROWEB da Agência Nacional de Águas (ANA), exibidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Estações pluviométricas usadas na pesquisa.

Código da Estação	Nome da Estação	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Período da Série
1547072	Bartolomeu - montante Paranoá	210253	8249242	2009 - 2017
1547073	Bartolomeu - jusante Paranoá	210687	8250263	2009 - 2017
1547076	Taboca	208399	8242943	2009 - 2018
1547077	Papuda	208424	8241036	2009 - 2017
1547020	ETE Paranoá	202169	8251218	1978 - 2019
1547048	ETE - São Sebastião	192626	8243337	2007 - 2019
1547019	ETA - Cabeça de Veado	194800	8241152	1978 - 2019

Para a pesquisa foi utilizado o Modelo Numérico de Terreno (MNT) gerado por meio das curvas de nível espaçadas em 5 metros disponíveis no Geoportal, plataforma de dados espaciais da SEGETH, em escala 1:10.000, ilustrado na Figura 4.2.

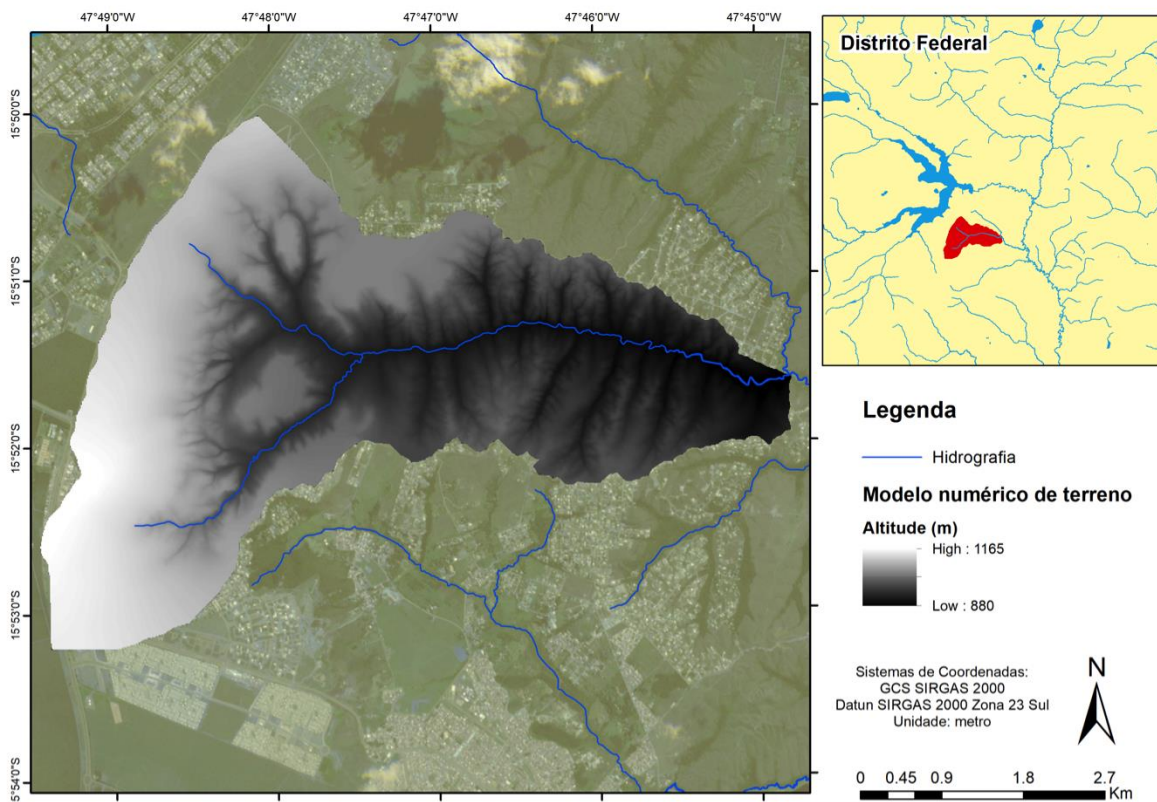


Figura 4.2: Mapa com o Modelo Numérico de Terreno (MNT).

4.2. MÉTODOS

A metodologia aplicada para o estudo da vulnerabilidade ambiental foi dividida em quatro etapas:

1ª) Produção do mapa de uso e cobertura do solo para os anos de 2000, 2011, 2014 e 2018 usando algoritmos para mapeamento temático de imagens no SPRING e ArcGIS, e com esses mapas produzir um mapa de suscetibilidade à ações antrópicas por meio da progressão do tempo.

2ª) Produção do mapa de zonas homólogas de relevo e uso do solo para refinamento dos dados de pedologia e geomorfologia.

3ª) Modelagem hidrológica e hidráulica com o HEC-HMS e HEC-RAS para produção do mapa de suscetibilidade à inundação.

4ª) Produção do mapa de vulnerabilidade ambiental, por meio de análise multicritério, abarcando os mapas de suscetibilidade à erosão laminar (EUPS) e linear (método baseado em geoindicadores), o mapa de suscetibilidade à ação antrópica (reclassificação dos mapa de uso

e cobertura do solo) e o mapa de suscetibilidade à inundação (modelagem com o HEC -HMS e HEC-RAS).

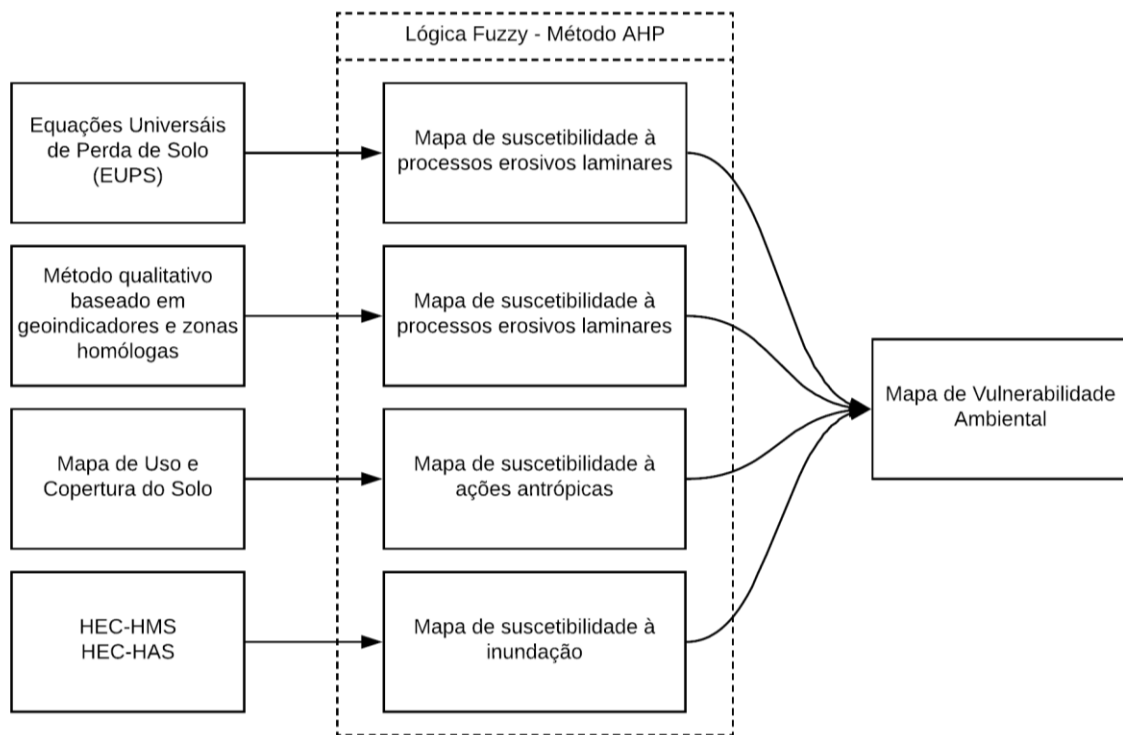


Figura 4.3: Metodologia para produção de Mapa de Vulnerabilidade Ambiental (Adaptado Almeida *et al*, 2017).

4.2.1. Mapas de uso e cobertura do solo

Os mapas de uso e cobertura do solo, principal subsídio para o mapa de suscetibilidade à ação antrópica, para os anos de 2000, 2011, 2014, 2018 foram elaborados por meio de algoritmos de geoprocessamento existentes no SPRING e no ArcGIS, por meio das imagens de satélite *Landsat e RapidEye* por meio da metodologia citada de Almeida *et al.* (2012), conforme explicitado na Figura 4.4, descrita a seguir:

- O realce de contraste tem como objetivo melhorar o aspecto visual de certas feições estruturais da imagem que apresentam critérios subjetivos ao olho humano, consiste em uma modificação radiométrica em cada pixel para aumentar a discriminação visual dos objetos na imagem. O realce de contraste será realizado por transformação linear do histograma.
- A fusão de imagens corresponde a fusão da banda pancromática de resolução espacial de 15 metros com as bandas multiespectrais do satélite Landsat 8.

- O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (IVDN) é um a operação aritmética, expressa na equação 10, utilizando as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, obtendo uma melhor descrição das áreas de vegetação conforme explicitado na Equação 4.1 (INPE, 2010).

$$IVDN = \frac{IR - R}{IR + R} \quad (4.1)$$

Em que, R é a banda correspondente à região do espectro eletromagnético da faixa do vermelho e IR a banda correspondente à região do espectro eletromagnético da faixa do infravermelho próximo.

- As componentes principais são um processamento digital baseado em algoritmos estatísticos, em que são usadas as bandas espectrais originais dos satélites para gerar um novo conjunto de imagens por meio de uma matriz de covariância entre as bandas, o que reduz a redundância espectral, ou seja, produz um novo conjunto de imagens com informações concentradas em três únicas imagens para a fase seguinte no processo de produção de mapas temáticos, a segmentação (INPE, 2010).
- A segmentação da imagem é um processo que separa a imagem em conjuntos de pixels contíguos distribuídos bidireccionalmente e uniformes, permitindo a criação de fronteiras de pixels que serão utilizadas na fase de treinamento da classificação temática. A segmentação será realizada usando a imagem do IVDN, as imagens dos componentes principais, as imagens com as bandas fusionadas e realçadas.
- Para a classificação temática das imagens serão utilizadas as três primeiras bandas de componentes principais, por possuírem mais de 85% das informações espectrais das bandas originais, a imagem produto do IVDN e a imagem segmentada. O algoritmo usado para a classificação será o classificador Bhattacharya, um classificador supervisionado em que serão delimitadas amostras do uso e cobertura do solo para treinar o classificador, calculando a média e a matriz de covariância de cada classe temática, posteriormente cada segmento é classificado em uma classe de uso e cobertura do solo (Correia *et al.*, 2007 apud Passo, 2013).
- Para finalizar a classificação temática será realizada uma vetorização e edição vetorial do Mapa de Uso e Cobertura do Solo resultante da classificação temática, tendo como comparativo a imagem Ikonos do Google Earth para promover um aperfeiçoamento do resultado do classificador.

As imagens do satélite Landsat 5 foram georreferenciadas por meio da técnica de registro de imagens por pontos de controle do ArcGIS, com referência nas coordenadas da imagem do Landsat 8. As classes temáticas adotadas para elaboração dos mapas de uso e cobertura do solo são: cerrado, mata de galeria, corpo d'água, solo exposto, área agrícola (incluindo pastagem) e área urbanizada.

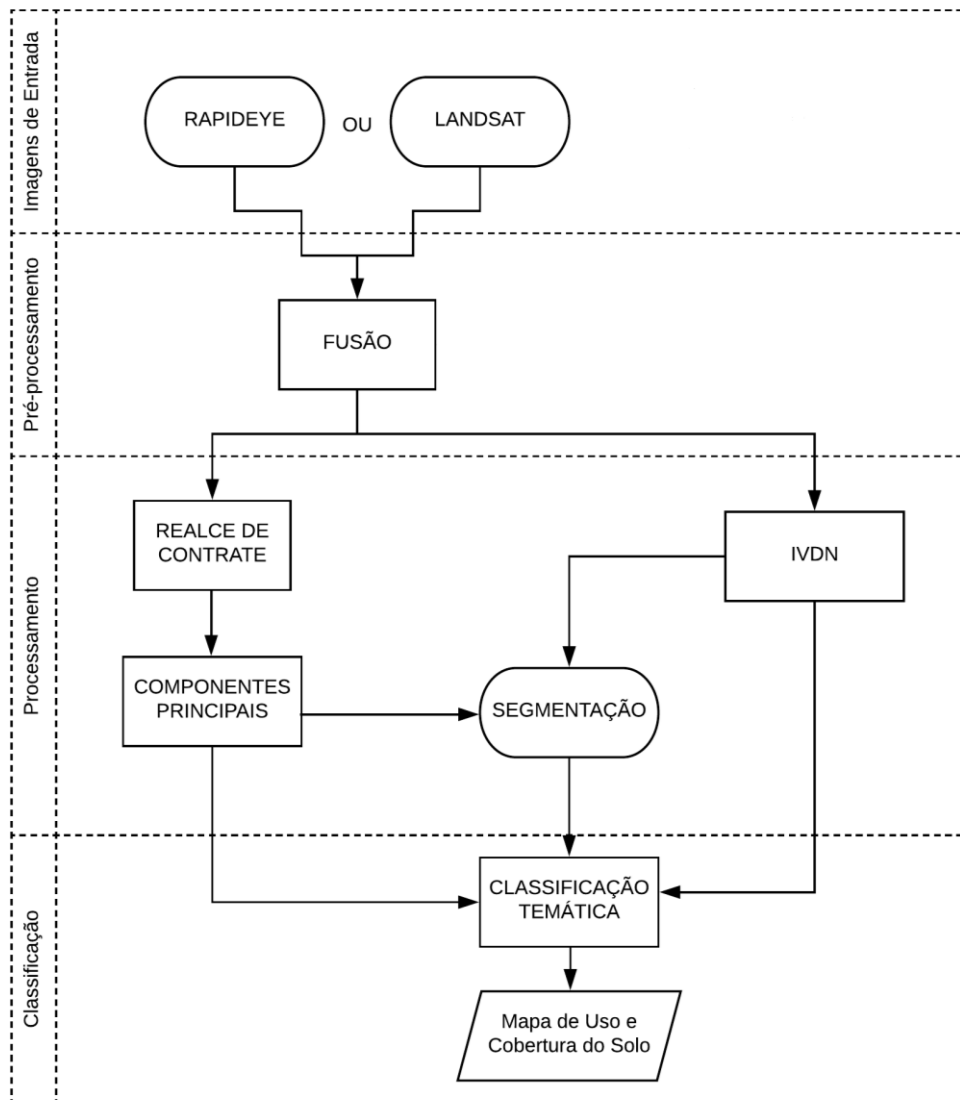


Figura 4.4: Etapas para o mapa de uso e cobertura do solo (Adaptado Almeida *et al*, 2012).

4.2.2. Mapa de susceptibilidade à erosão laminar

O procedimento metodológico adotado para obtenção da suscetibilidade à erosão laminar, foi abordado no item 3.2.1, com solução dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS) atualizada por Wischmeier & Smith (1978).

O fator de erosividade da chuva (R) foi calculado de acordo com a Equação 3.2, com as média de precipitação anual e mensal das 7 estações pluviométricas citadas na Tabela 4.2. O mapa com o fator R foi elaborado por meio da interpolação com o Polígono de Thiessen gerado com os pontos das estações pluviométricas no software ArcGIS, em que cada ponto terá uma área de influencia com valor de erosividade igual ao valor do ponto da estação de pluviométrica.

O fator de erodibilidade do solo (K) será obtido com base nos dados da bibliografia determinados por Bertoni & Lombardi Neto (2012) para o Estado de São Paulo, expostos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Valor de erodibilidade das classes de pedologia.

Código	Pedologia	Valor de erodibilidade (K)
Cx	Sílica / argilosa	0.072
LVA	Argilosa média / arenosa	0.013
LV	Muito argilosa / argilosa	0.015
NV	Muito argilosa / argilosa	0.018

O fator topográfico (LS) foi calculado por meio da equação 3.6, com o mapa de declividade e o mapa de fluxo acumulado obtidos com o MNT produzido com as curvas de nível do Geoportal. A declividade foi calculada com a função *Slope* do ArcGIS, e o fluxo acumulado foi calculado em duas etapas, primeiro calculando a direção de fluxo por meio da função *Flow direction* e, por fim com a função *Flow Accumulation*. Para processar todos os dados foi utilizada a ferramenta de álgebra de mapas.

Para esse trabalho foram considerados para o fator de uso e manejo do solo (C) e o de práticas conservacionistas (P) os valores atribuídos por Almeida *et al* (2012) expressos na Tabela 3.2, obtidos a partir dos mapas de cobertura de solo.

4.2.3. Mapa de susceptibilidade à erosão linear

O mapa de susceptibilidade a erosão linear foi elaborado por meio de uma adaptação ao modelo qualitativo baseado em geoindicadores proposto por Campagnoli (2002). Como passos iniciais foram classificados as secções pedológicas com base na textura e na espessura dos solos, de modo que solos argilosos são classificados com I, pouca suscetibilidade, e solos arenosos e profundos são classificados como V, suscetibilidade muito alta, e os valores

intermediários serão classificados entre II, III e IV. Na Tabela 4.4 está a classificação da vulnerabilidade dos tipos de pedologia da área, expostos na Figura 4.1.

Tabela 4.4: Classificação do grau de suscetibilidade a erosão das Unidades Pedológicas.

Código	Textura	Grau de suscetibilidade
Cx	Sílica / argilosa	III
LVA	Argilosa média / arenosa	IV
LV	Muito argilosa / argilosa	I
NV	Muito argilosa / argilosa	I

Na Tabela 4.5 está a classificação da suscetibilidade a processos erosivos das secções geológicas de acordo com o critério da Tabela 3.3.

Tabela 4.5: Classificação do grau de suscetibilidade a erosão das Unidades Geológicas.

Código	Geologia	Litologia	Grau de suscetibilidade
MNPcf	Grupo Canastra	Filitos	II
MNPpq3	Grupo Paranoá	Quartzitos Médios	I
MNPpr4	Grupo Paranoá	Metarritmito Argiloso	III

Os dados pedológicos e geológicos foram reclassificados com as zonas homólogas de relevo e cruzados com o algoritmo de álgebra de mapas no ArcGIS e avaliados segundo os atributos da Tabela 3.4. Para finalizar o mapa de suscetibilidade a erosão linear o mapa geopedológico foi cruzado, por meio da ferramenta de álgebra de mapas, com as classes de declividade de acordo com os atributos da Tabela 3.5.

4.2.4. Mapa de áreas suscetíveis à inundação

4.2.4.1. Modelagem Hidrológica

A elaboração do mapa de suscetíveis à inundação foi dividida em duas etapas, a conversão de dados pluviométricos para vazão de projeto segundo os tempos de retorno de 1, 5, 10, 20, 50 e 100 anos pelo método de Vem Te Chow, explicitado no item 3.8, e a modelagem hidráulica

com o software HEC-RAS para gerar os polígonos de inundação com as respectivas alturas da coluna d'água.

Na Figura 4.5 estão descritos as etapas para o cálculo da vazão de projeto pelo método de Vem Te Chow.

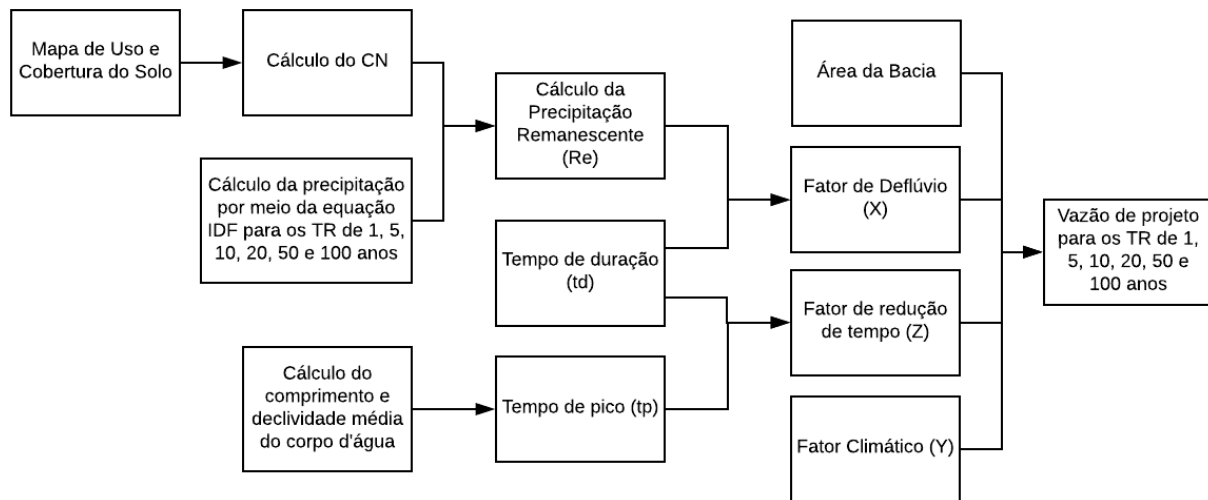


Figura 4.5: Fluxograma para o cálculo da vazão de projeto segundo o método de Vem Te Chow.

Para o cálculo do *curve number* (CN), importante fator para descrever a capacidade de infiltração do solo da bacia, foi usado o mapa de uso e cobertura do solo elaborado para o ano de 2014, atualizando apenas as áreas de ocupação urbana e solo exposto, devido a maior escala do mapa. O Latossolo Vermelho Amarelo foi classificado com tipo A, o Cambissolo Háplico como tipo B e o Latossolo Vermelho e o Nitossolo Vermelho como Tipo C, segundo os atributos das tabelas 3.7 e 3.8 o valor de CN para a bacia de estudo foi de 64,38.

Com a equação 3.9, I-D-F elaborada pela NOVACAP (2005) para o Distrito Federal foi calculado a precipitação para diferentes tempos de duração e tempos de retorno de 1, 5, 20, 50 e 100 anos. Com o valor de CN e o valor de precipitação, usando as Equações 3.8 e 3.9 foi calculada a precipitação excedente (Re), ou seja, a precipitação que não infiltrou no solo.

O comprimento linear e a declividade média do corpo d'água foram calculados com auxílio do software ArcGIS 10.6, com essas informações foi calculado o tempo de tico (t_p), por meio da Equação 3.10. Com a razão entre o tempo de pico e o tempo de duração foi correlacionado com os valores do fator de redução de pico (Z) presentes na Tabela 3.9.

Com o fator climático (Y), o fator de redução de pico (Z), o fator de deflúvio e a área da bacia são calculadas as vazões de projetos para os diferentes períodos de retorno, já mencionados.

4.2.4.2. Modelagem Hidráulica

Na Figura 4.6 estão ilustradas as etapas para a elaboração de áreas suscetíveis a inundação no HEC-RAS, adaptado da metodologia de Silva (2013).

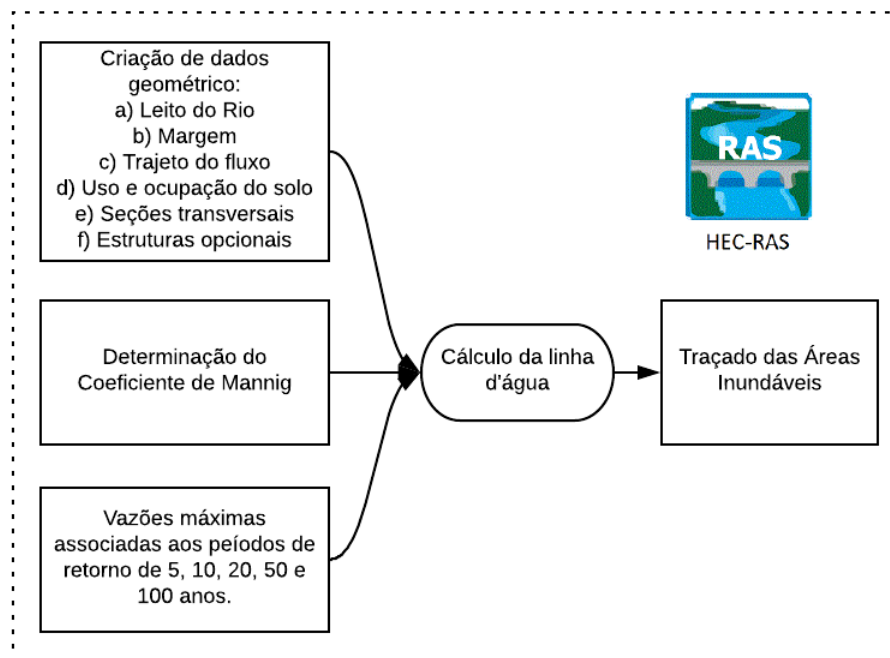


Figura 4.6: Fluxograma para o traçado das áreas suscetíveis as inundações no HEC-RAS.

Para a modelagem hidráulica realizada no HEC-RAS foram desenhadas as margens do rio, os trajetos do fluxo, as seções de corte uso e ocupação do solo, seções transversais por meio da ferramenta *RAS Mapper View*. Para a análise de inundação foram modelados os 6500 metros finais do Ribeirão Taboca pertencentes à bacia de estudo, foram desenhadas 56 seções transversais, sem espaçamento e tamanhos uniformes, conforme indicado na Figura 4.7 que apresenta a geometria de entrada para o software HEC-RAS. As seções transversais foram tridimensionalizadas, como indicado na Figura 4.8, com o modelo numérico de terreno (MNT), e desenhadas com o apoio da imagem do satélite Rapideye de modo que não houvesse sobreposição de seções para evitar maiores erros na análise. A figura 4.8 apresenta uma das seções tridimensionalizadas, com inundação para tempo de retorno (TR) de 100 anos.

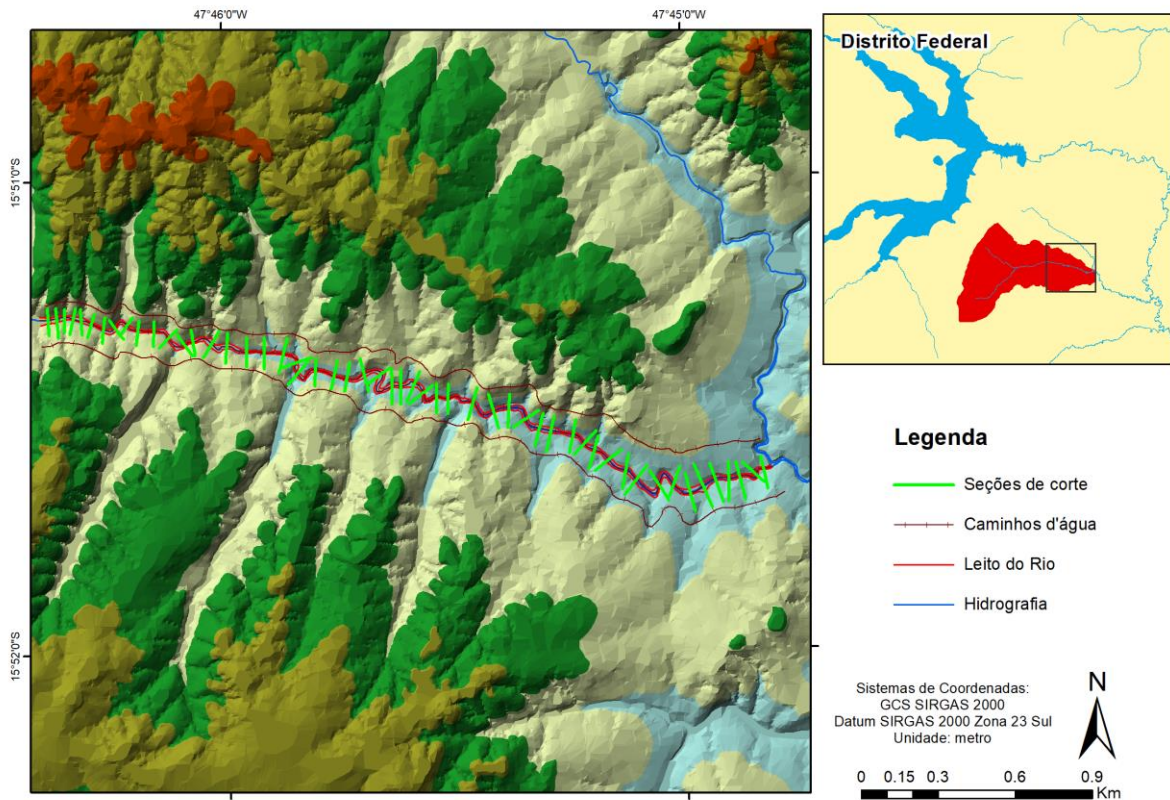


Figura 4.7: Geometria de entrada para o software HEC-RAS.

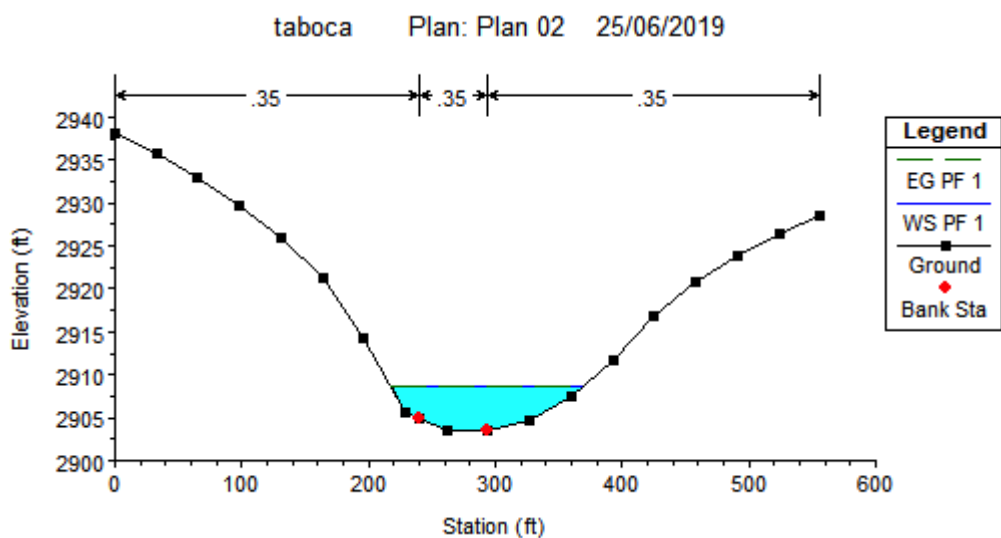


Figura 4.8: Seção tridimensionalizada, com inundação para TR de 100 anos.

O Coeficiente de Manning foi determinado como 0,035, de acordo com a classificação em meandros, bancos e poços pouco profundos, limpos e em condições muito boas, pela área na proximidade desse trecho ser preservada. Para esta análise foi adotado regime misto com escoamento permanente.

Com o traçado dos polígonos de inundação foram atribuídos os graus de vulnerabilidade para a aplicação da AHP, em que para a área inundada com período de retorno igual a 1 ano foi atribuído peso V, pela maior probabilidade de inundação; para a área inundada com período de retorno igual a 20 anos foi atribuído peso III; e, para 100 anos de TR, foi atribuído peso I.

4.2.6. Mapa de suscetibilidade às ações antrópicas

O mapa de suscetibilidade às ações antrópicas foi produzido a partir dos mapas de uso e cobertura do solo dos anos 2000, 2011, 2014 e 2018. Para atribuir os graus de vulnerabilidade se estabeleceu uma progressão temporal das classes “área urbana” e “solo exposto”, em um único mapa. A classe agricultura e pastagem não entraram na progressão temporal, baseada em exames das imagens e visita ao campo, por não serem significativas e não apresentarem continuidade ao longo dos anos, muitas áreas foram convertidas em zonas urbanas. Na Tabela 4.6 abaixo estão os graus de vulnerabilidade atribuídos ao mapa de suscetibilidade às ações antrópicas.

Tabela 4.6: Graus de vulnerabilidade atribuídos a classes do mapa de vulnerabilidade à ações antrópicas.

Classes	Graus de Vulnerabilidade
Áreas antropizadas entre 2011 e 2018	V
Áreas antropizadas entre 2000 e 2011	IV
Agricultura	III
Corpos d’água	II
Mata de Galeria e Cerrado	0

Para as áreas antropizadas entre os anos de 2011 e 2018 foi atribuído um peso maior, visto que são áreas ainda em modificação, sofrem mais com o processo de antropização e ainda não são áreas urbanas consolidadas, estão mais vulneráveis a processos erosivos e tendem a ocorrerem em áreas de maior declividade. As áreas antropizadas antes do ano de 2011, foram consideradas com uma urbanização já consolidada, muitas vezes, com tendência a densificação ou ao crescimento vertical e não mais horizontal, por isso foi atribuído um peso menor. Para a classe corpos d’água foi atribuído peso II, pois nos mapas de uso e cobertura de solo, os corpos d’água detectados foram pequenos reservatórios artificiais, que podem apresentar risco de rompimento, além de vulnerabilidade maior a processos erosivos.

4.2.5. Mapa de vulnerabilidade ambiental

O mapa de vulnerabilidade ambiental foi produzido com base no algoritmo de análise multicritério presente na Análise Hierárquica de Processos (AHP), integralizando o mapa de suscetibilidade à erosão laminar, o mapa de suscetibilidade à erosão linear e o mapa de suscetibilidade à inundação e o mapa de suscetibilidade às ações antrópicas, por meio da ferramenta álgebra de mapas do ArcGIS.

Os mapas são classificados com grau de suscetibilidade de I a V, para finalmente criar um mapa final de vulnerabilidade ambiental atribuindo pesos baseado na revisão bibliográfica abordada na pesquisa.

5) RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. MAPA DE SUSCETIPIBILIDADE ÀS AÇÕES ANTRÓPICAS

O resultado da metodologia exposta no item 4.2.1 para a confecção dos mapas de uso e cobertura do solo com as imagens do satélite Landsat 8 para o ano de 2018, Landsat 5 para o ano 2000 e RapidEye para os anos de 2011 e 2014 está ilustrado na Figura 5.1, com os quantitativos de área na tabela 5.1, referente às classes temáticas dos mapas.

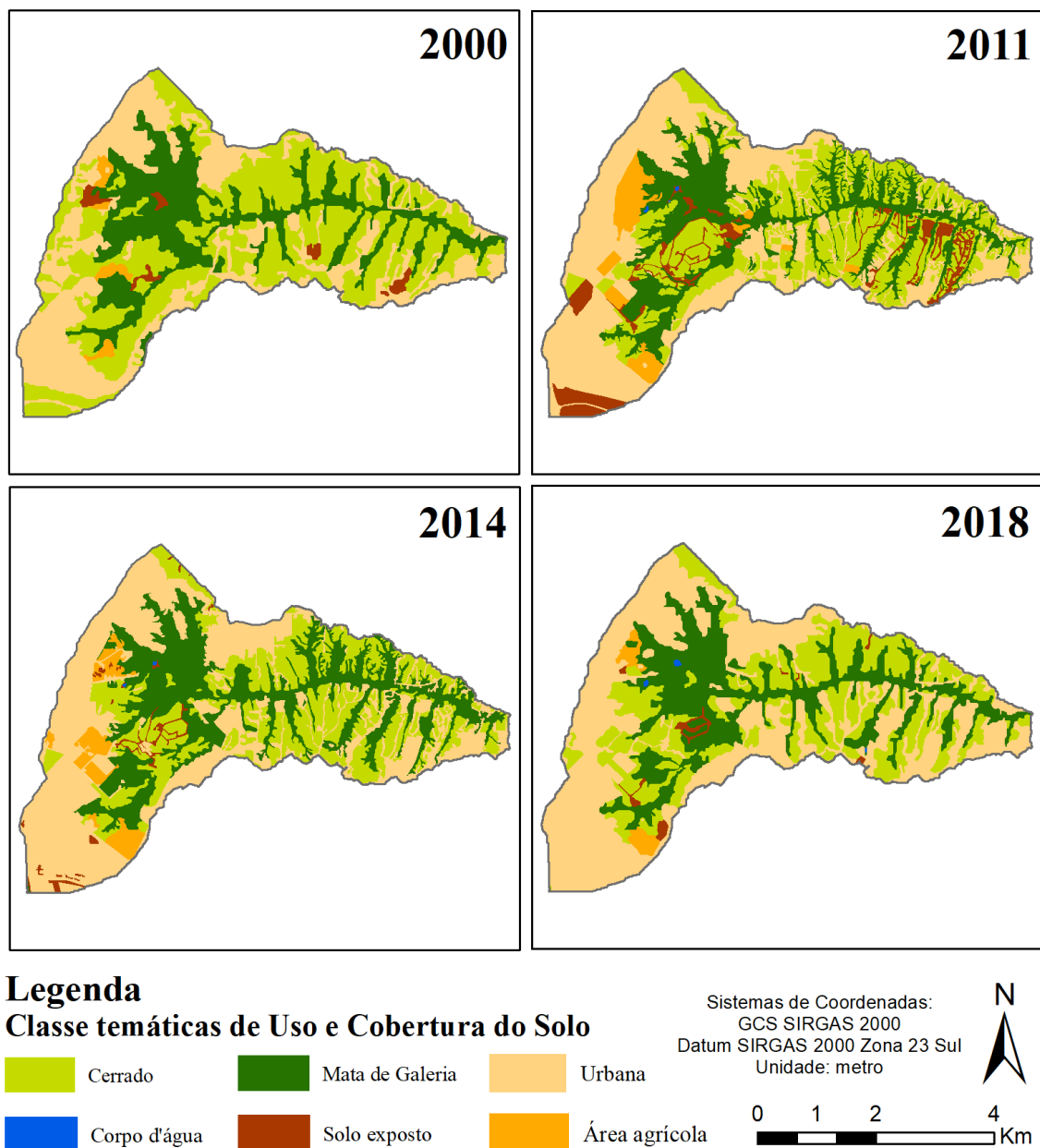


Figura 5.1: Mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2000, 2011, 2014 e 2018.

Tabela 5.1: Quantitativo de área das classes de uso e cobertura do solo.

Classes de Uso e Ocupação do Solo	Área (km²)			
	2000	2011	2014	2018
Área Agrícola	0,32	1,02	0,81	0,31
Cerrado	9,77	6,89	6,22	6,47
Mata de Galeria	8,23	5,02	6,10	5,35
Solo Exposto	0,34	1,45	0,30	0,23
Urbana	7,03	8,31	9,26	10,34
Corpo d'água	0,00	0,01	0,01	0,02

Para essa análise era esperado um quantitativo decrescente para as classes de uso e cobertura do solo, como cerrado e mata de galeria, ao longo dos anos, e crescente para as classes solo exposto e urbano. Entretanto é importante enfatizar dois fatores que influenciam negativamente a análise, o primeiro é a diferença na resolução espacial entre as imagens dos diferentes satélites, variando entre 30, 15 e 5 metros, como indicado na Tabela 4.1, o segundo fator é o período do ano em quais as imagens de satélites foram registradas. Como o Distrito Federal apresenta grandes variações na sazonalidade ao longo do ano, estação seca e outra chuvosa, aparentam-se variações na mata de galeria, no período chuvoso é mais exuberante e no período seco menor. As imagens dos anos 2000, 2011 e 2018 foram registradas no mês de setembro, período de seca e a imagem do ano de 2014 foram registradas no período chuvoso, justificando a maior área de galeria para o ano de 2014 em comparação ao ano de 2011.

Observa-se um aumento significativo das classes de solo exposto para o ano de 2011 em comparação com os anos seguintes. Isto é justificado pela conversão dessas áreas em uso urbano, pois no período em que foram registradas eram canteiros de obra ou vias não asfaltadas. As classes de corpo d'água são representadas por pequenos reservatórios artificiais registrados pelo algoritmo de classificação.

Com os mapas de uso e cobertura do solo expostos na Figura 5.1 foram mapeadas os acréscimos entre as classes de uso e cobertura antrópicas (urbana e solo exposto) ao longo dos anos, pela influência da antropização da paisagem na infiltração do solo e nos processos erosivos, o resultado está ilustrado na Figura 5.2.

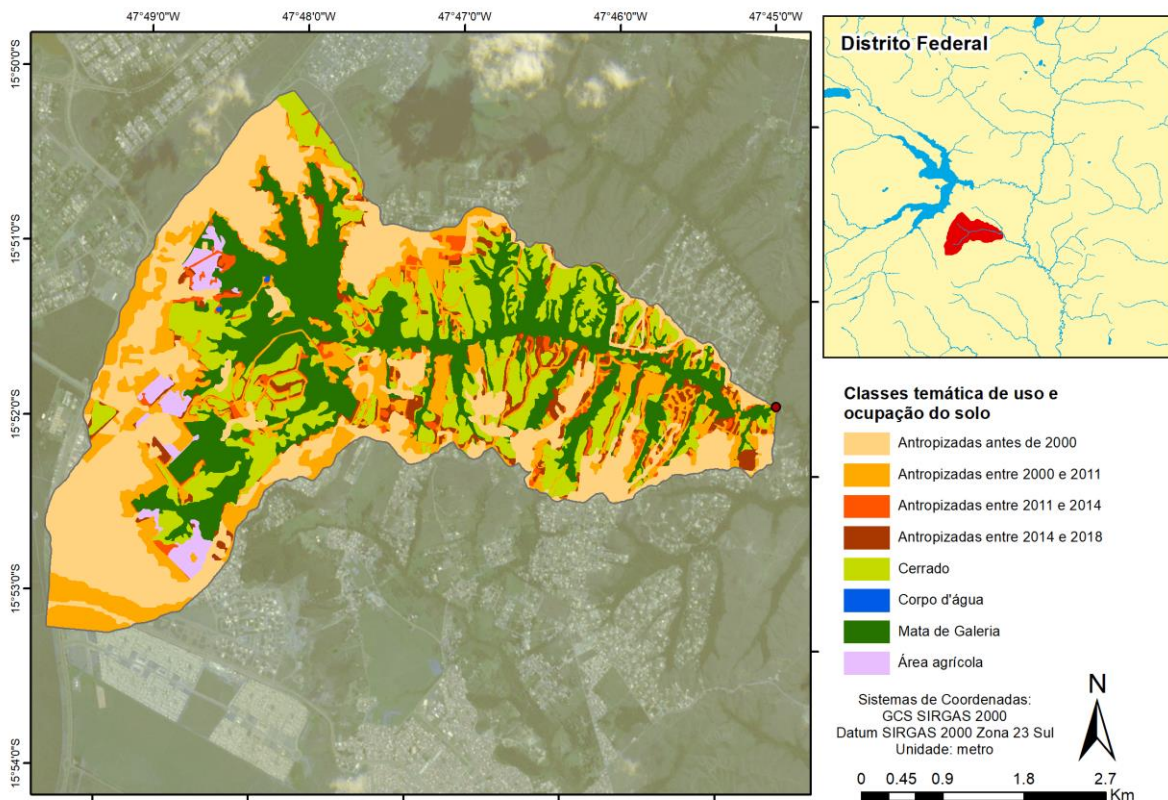


Figura 5.2: Mapa de avanço do processo de urbanização.

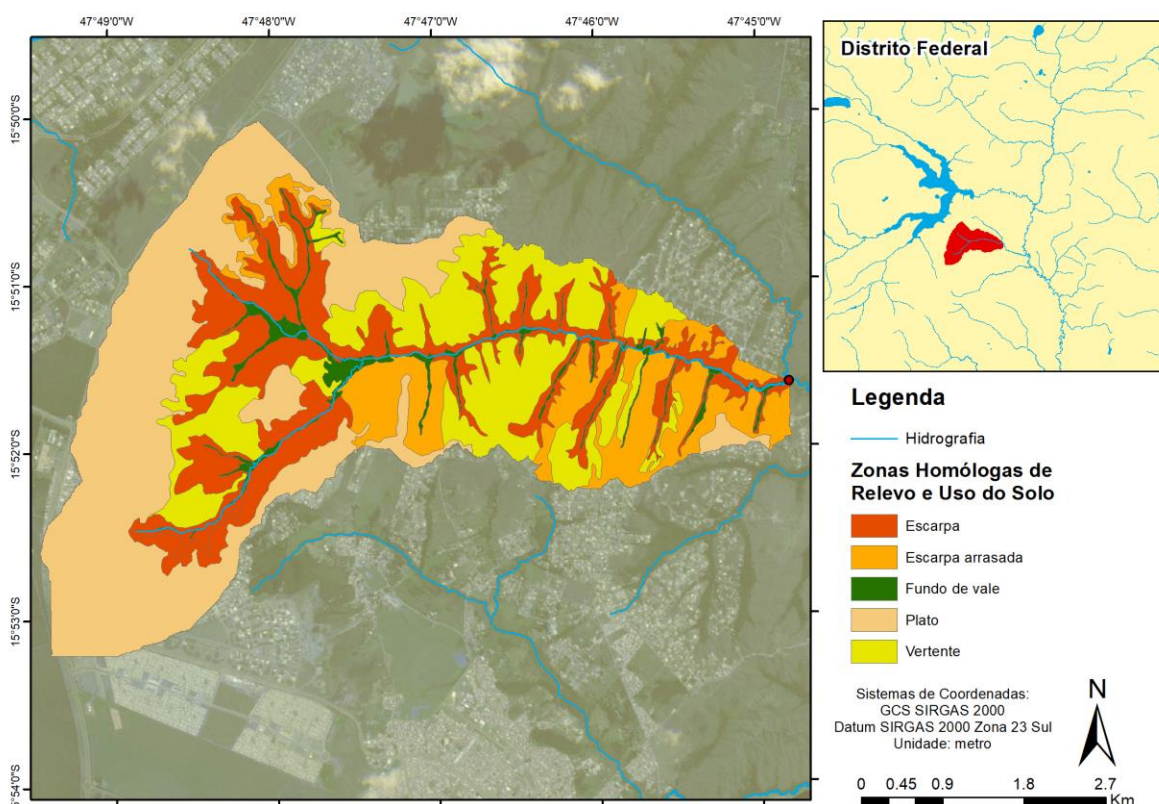
Na Tabela 5.2 está demonstrado o quantitativo do crescimento urbano entre os períodos representados no mapa. O valor total das áreas antropizadas, é maior que a soma das áreas das classes urbana e solo exposto, equivalente a 10,57 km², devido à diferença da resolução espacial e do período de registro das imagens de satélite.

Tabela 5.2: Quantitativo do crescimento das áreas antrópicas.

Classes	Área	
	Km ²	%
Antropizadas antes de 2000	6,75	53,06
Antropizadas entre 2000 e 2011	4,47	33,37
Antropizadas entre 2011 e 2014	0,72	5,71
Antropizadas entre 2014 e 2018	0,34	7,86
Total	12,73	

5.2. ZONAS HOMÓLOGAS DE RELEVO E USO DO SOLO

Para melhor adequar os dados disponíveis de pedologia, em escala em 1:250.000, e geomorfologia, em escala 1:1.000.000 considerando o relevo e o uso do solo foram criadas as zonas homologas de relevo, segundo a metodologia explicitada no item 3.3.2, com auxilio do MNT, Google Earth e imagem do satélite RapidEye. O resultado esta ilustrado na Figura 5.3.



Como explicitado na Tabela 5.3, o quantitativo de áreas das zonas homologas, observa-se que o somatório das zonas homologas escarpa, escarpa arrasada e vertente são predominantes indicando uma área com terreno majoritariamente acidentado, em que a remoção da vegetação natural pode incrementa de maneira mais forte os processos erosivos.

Tabela 5.3: Quantitativo de área das zonas homologas.

Zona Homóloga	Área(km ²)	Área (%)
Escarpa	5,11	22,52
Escarpa arrasada	3,25	14,33
Fundo de vale	0,86	8,82
Platô	8,55	33,69
Vertente	4,91	21,65

Em seguida foram reclassificados os dados de geomorfologia e pedologia como explicitado na figura 5.4, com destaque a readequação das tipologias geológicas segundo os platôs, permitindo um maior refinamento do dado.

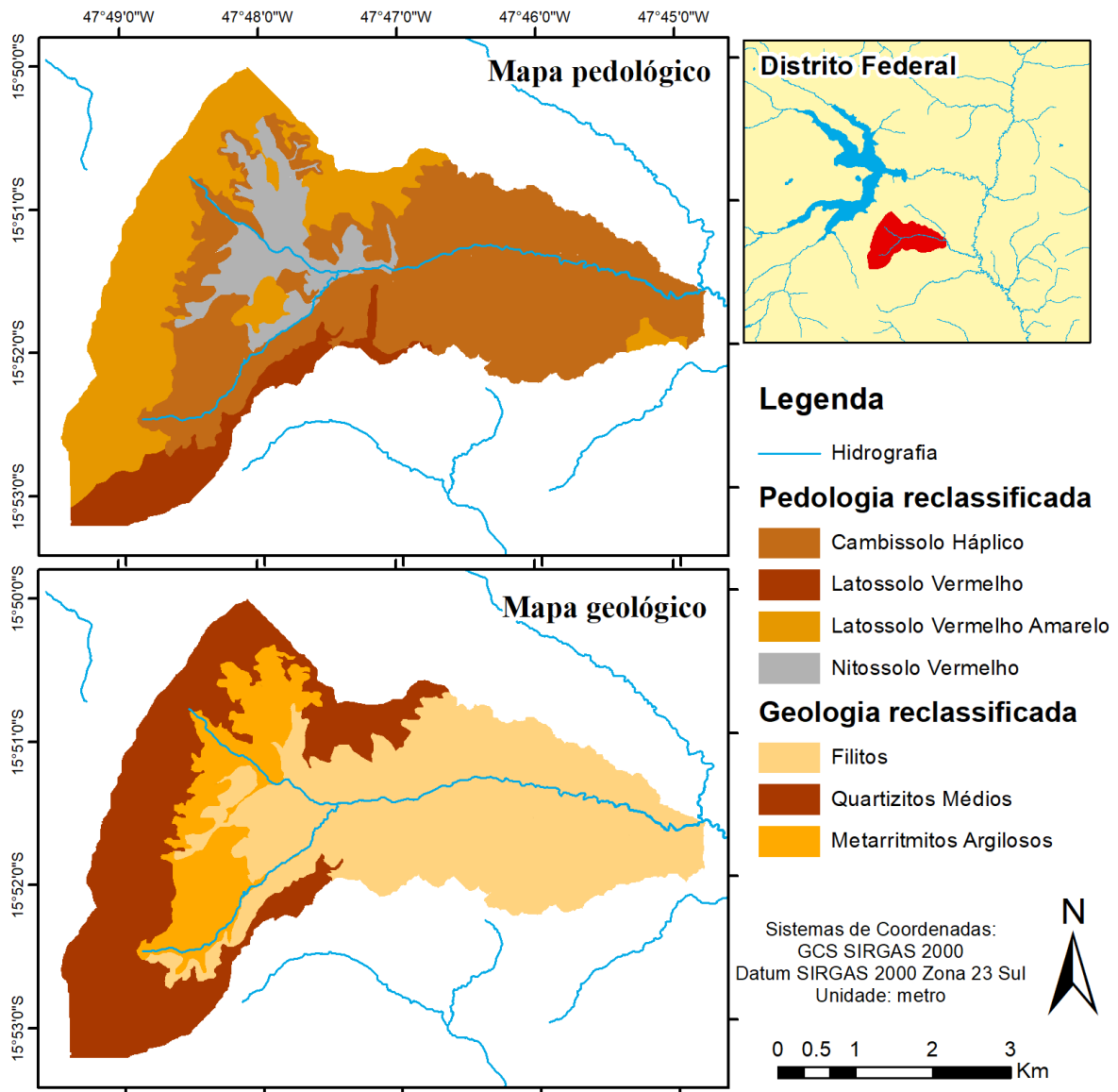


Figura 5.4: Mapa com a pedologia e geologia reclassificada segundo as zonas homólogas.

5.3. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LINEAR

O mapa de suscetibilidade à erosão linear foi elaborado segundo a metodologia explicitada no item 3.3.2. O cruzamento dos dados de geologia e pedologia reclassificados por zonas homólogas, segundo as classes da Tabela 3.4, tem como resultado o mapa de geopedologia está ilustrado na Figura 5.5.

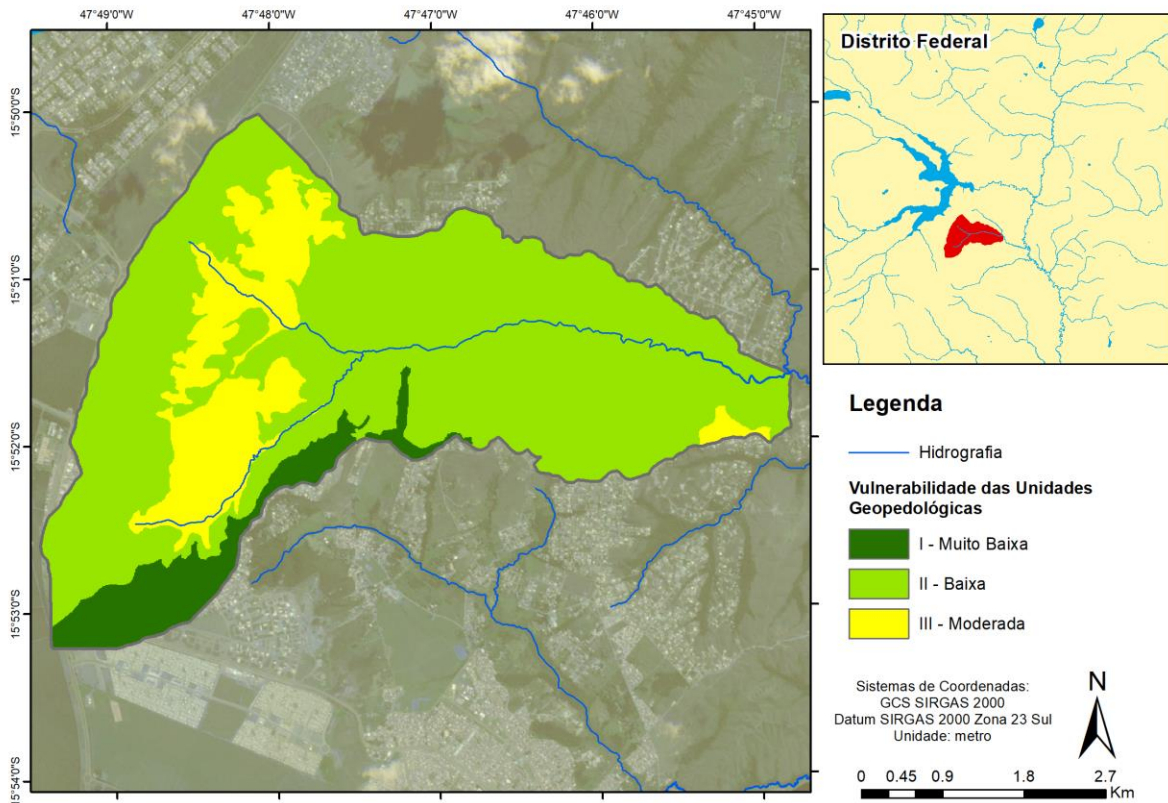


Figura 5.5: Mapa de Geopedologia.

As áreas do mapa de geopedologia, em sua maioria, apresentam uma baixa vulnerabilidade a processos erosivos; entretanto, nas áreas em amarelo, que coincidem com áreas de relevo acidentado, há uma vulnerabilidade moderada, o que pode ser um fator de risco considerável quando acompanhada de processos de urbanização.

O mapa de declividade, calculado com as curvas de nível do Distrito Federal, agrupado em classes, para o posterior cruzamento com o mapa de geopedologia, como exposto na Figura 5.6.

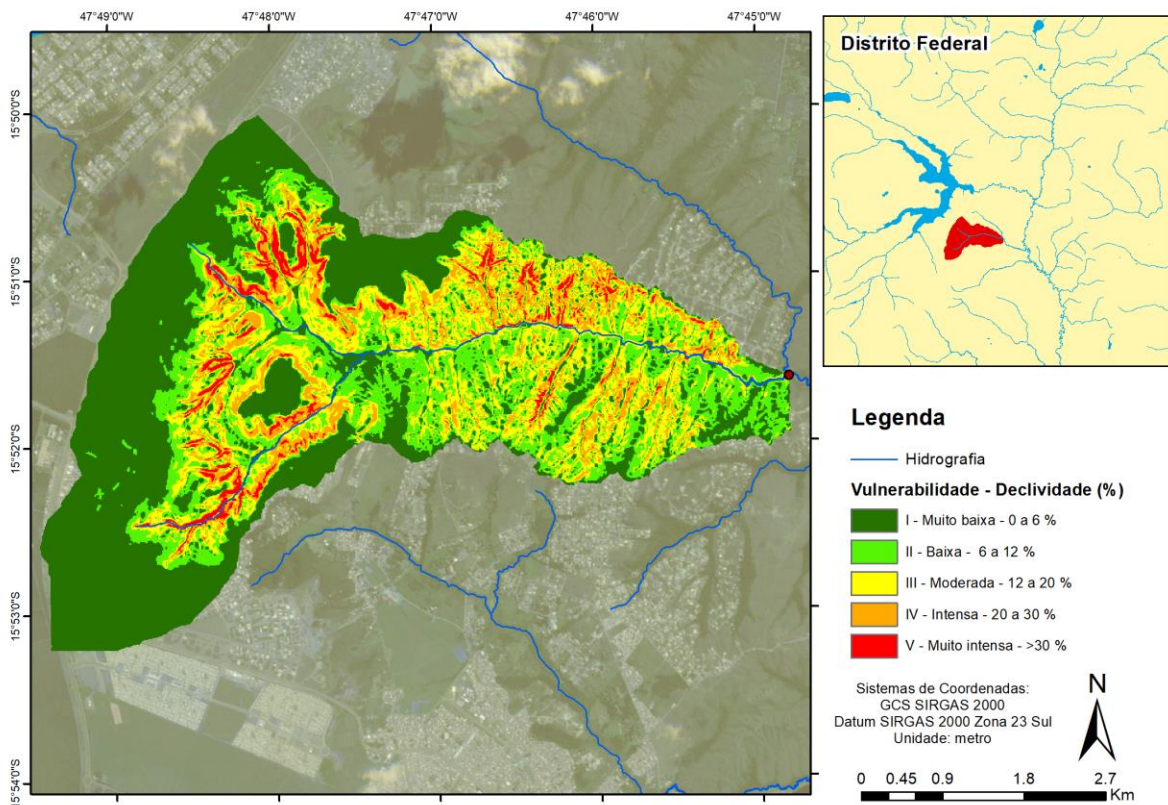


Figura 5.6: Mapa de declividade, em graus, dividido em zonas de vulnerabilidade.

Finalmente, para o cálculo do mapa de suscetibilidade à erosão linear realizou-se o cruzamento com a declividade, em graus, segundo o critério expresso pela Tabela 3.5, com o resultado expresso na Figura 5.7.

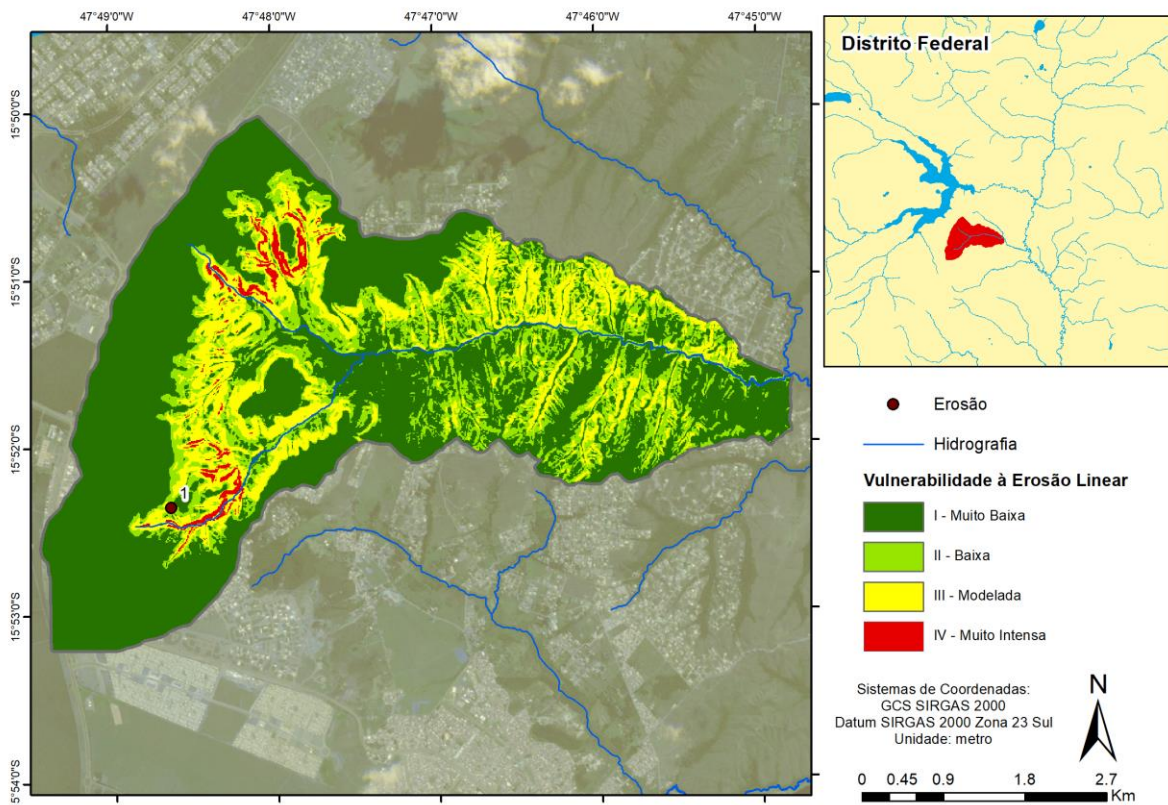


Figura 5.7: Mapa de suscetibilidade a erosão linear.

Pela análise da Figura 5.7, nas áreas de zonas homólogas tipo platô, coincidente com uma área de ocupação urbana consolidada, é observado uma vulnerabilidade à erosão linear muito baixa. Como essas áreas já estão consolidadas em sua maioria há uma tendência de expansão urbana em direção a áreas com vulnerabilidade moderada a muito intensa. Foi diagnosticado por Camapum (2015, *apud Almeida et al*, 2017) que às áreas com variações de relevo em formato convexo em geral, estão mais suscetíveis aos processos de erosão laminar, o que pode ser observado no resultado expresso na Figura 5.7.

Como diagnosticado no ponto 1, ilustrado na Figura 5.8, uma voçoroca, presente em área com vulnerabilidade à erosão linear moderada e próximas a áreas com ocupação antrópica, em que a infiltração natural do solo reduzida acarretou maior escoamento, agente intensificador de processos erosivos lineares.



Figura 5.8: Voçoroca localizada no ponto 1 indicado no mapa da figura 5.7

5.4. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À EROSÃO LAMINAR

O mapa de suscetibilidade à erosão laminar é calculado por meio da Equação Universal de Perda de Solo (Equação 3.1). Os fatores calculados segundo a metodologia expressa no item 4.2.2 estão ilustradas na Figura 5.9.

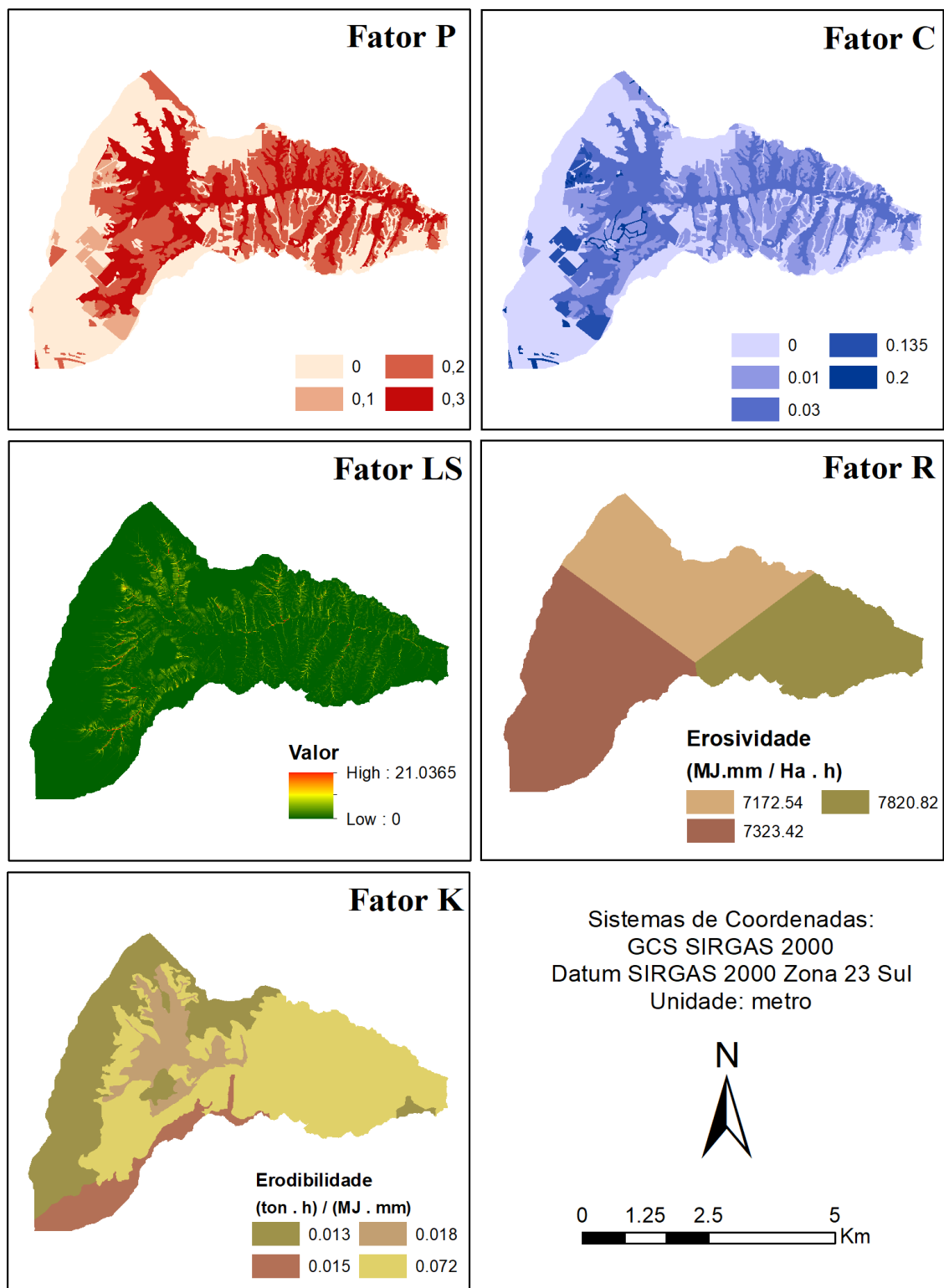


Figura 5.9: Parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo (EUPS).

Com o cálculo da Equação 3.1 pela ferramenta de álgebra de mapas do ArcGIS, *raster calculator*, obteve-se o mapa de vulnerabilidade a erosão laminar indicado na Figura 5.10.

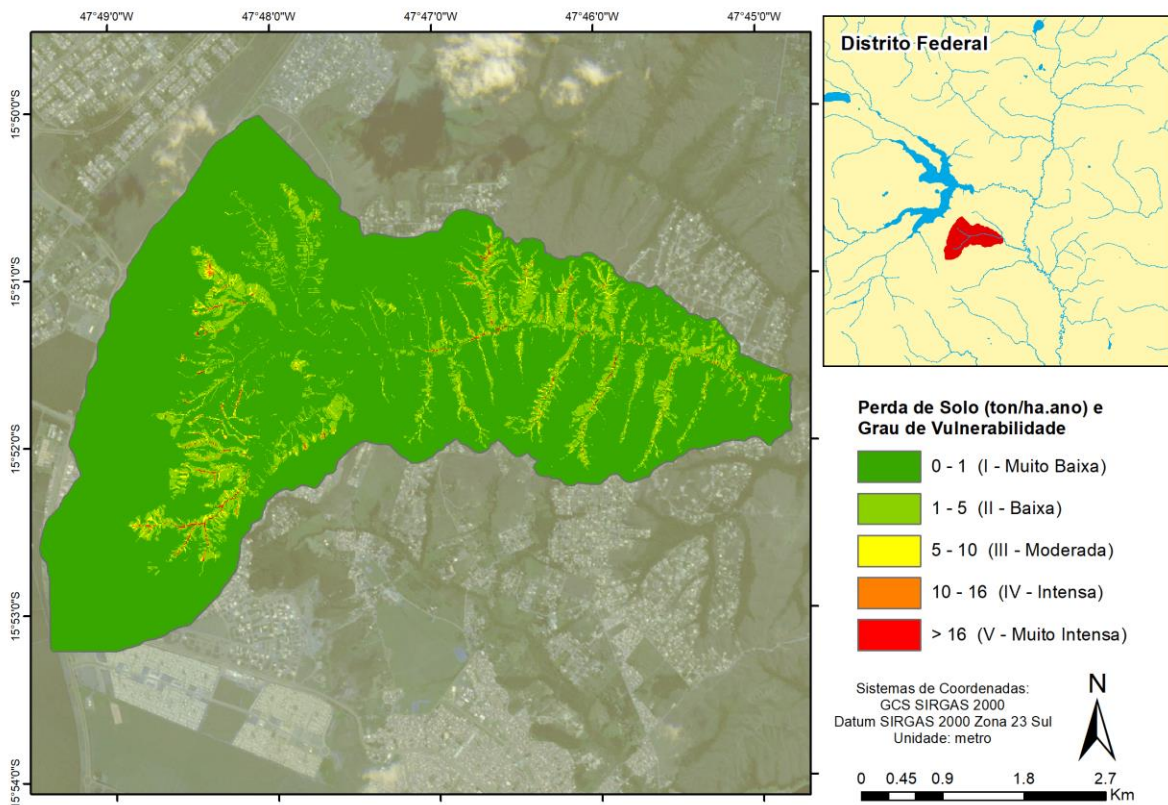


Figura 5.10: Mapa de suscetibilidade à erosão laminar.

A área de estudo, em geral apresenta uma baixa suscetibilidade à processos erosivos laminares; entretanto, nas áreas próximas às drenagens naturais do Ribeirão Taboca encontra-se área com alto índice de perda de solo anual, o que com a intensificação da antropização pode tornar-se mais intensa e acarretar na diminuição da qualidade da água desse Ribeirão. O valor de perda de solo para a região não pode ser considerado absoluto, pois não houve validação de campo e experimentos laboratoriais para dar mais consistência aos dados; entretanto, é uma importante ferramenta principalmente no auxílio à tomada de decisões quanto ao zoneamento ambiental da região.

5.5. MAPA DE SUSCETIBILIDADE À INUNDAÇÃO

As áreas suscetíveis à inundação foram calculadas segundo a metodologia descrita no item 4.2.4. Pelo método de Vem Te Chow obteve-se as vazões máximas para os tempos de retorno de 1, 5, 10, 20, 50 e 100 anos, com esses valores foi desenhado o hidrograna unitário de escoamento para os respectivos Tempos de retorno, representado na Figura 5.11.

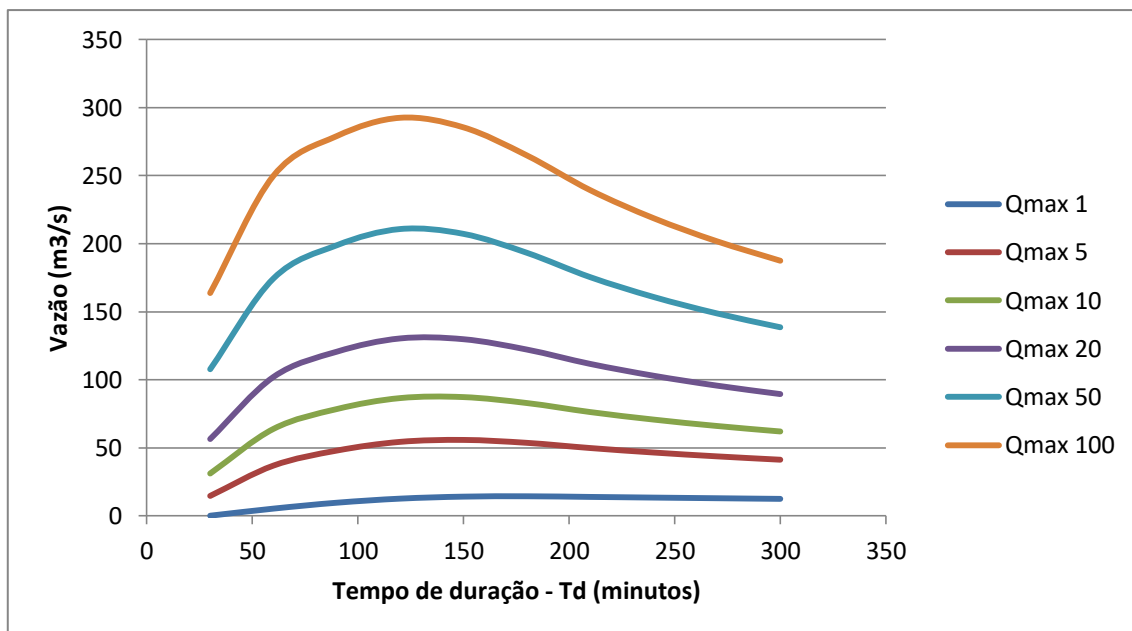


Figura 5.11: Hidrograma unitário de escoamento.

Para valor de entrada no ArcGIS foram escolhidos as vazões para o tempo de duração de 270 min, pelo interesse de valores de chuvas extremos para a delimitação dos polígonos com as áreas de inundação. Os valores de vazão para cada período de retorno estão descritos na tabela abaixo, tal qual as áreas inundadas. Na Figura 5.12, estão ilustradas as áreas suscetíveis à inundação para os diferentes valores de vazão citados nas Tabelas 5.4,e 5.5 a área alagada para cada TR.

Tabela 5.4: Vazão de projeto para os tempos de retorno usados como dados de entrada para o HEC-RAS.

Q_{máx} (m³/s)					
TR 1 ano	TR 5 anos	TR 10 anos	TR 20 anos	TR 50 anos	TR 100 anos
13,02	43,77	66,09	95,72	148,77	200,72

Tabela 5.5: Área alagada e porcentagem alagada em comparação a área total da bacia.

Área (m²)					
TR 1 ano	TR 5 anos	TR 10 anos	TR 20 anos	TR 50 anos	TR 100 anos
79.792,00	100.864,00	114.945,00	128.527,00	150.317,00	169.272,00
0,35 %	0,44 %	0,50 %	0,56 %	0,66%	0,74 %

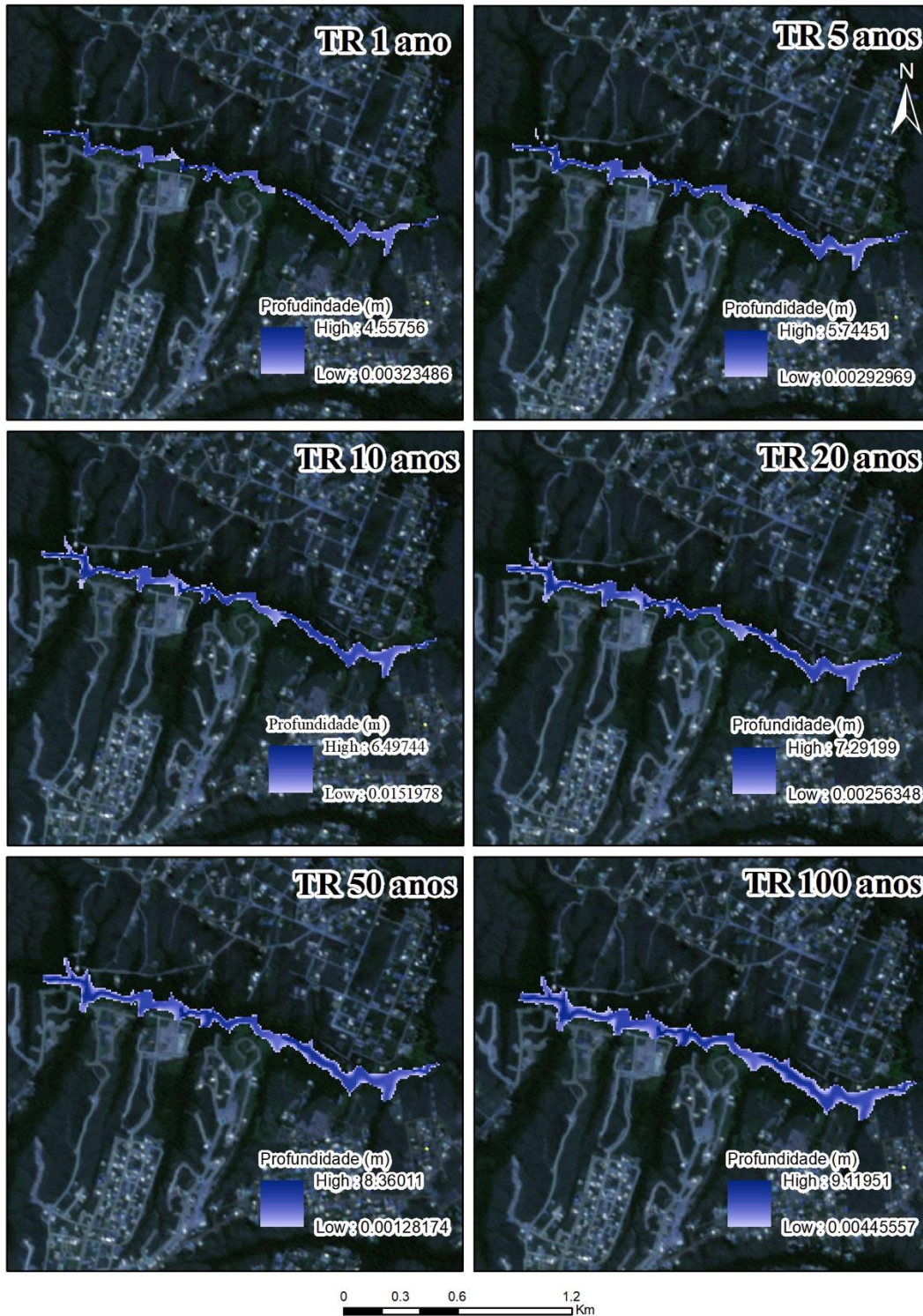


Figura 5.12: Áreas suscetíveis à inundação calculadas pelo HEC-RAS.

Observa-se que mesmo para o tempo de retorno de 100 anos, o percentual de área alagada na bacia é de apenas 0,74%, o que aparenta ser um percentual desprezível; entretanto, é uma área equivalente a 15 campos de futebol, com áreas que chegam a ter seções de 160 metros de alagamento. Cabe ressaltar que não há levantamentos de inundação para a região, entretanto

essa análise é de suma importância, principalmente para ordenamento da expansão urbana, para que não seja realizada em áreas suscetíveis à inundação. As profundidades exibidas na Figura 5.12 possuem um fator de confiança menor, visto que o erro associado ao modelo digital de elevação é de 10 metros.

Para a inclusão do mapa de áreas suscetíveis à inundação na análise hierárquica de processos, foi atribuído grau V para a poligonal alagado com o tempo de retorno de 1 anos, pela alta probabilidade de ocorrência, grau III para tempo de retorno igual a 20 anos e grau 1 para tempo de retorno igual a 1 ano.

5.6. MAPA DE VULNERABILIDADE AMBIENTAL

Com os mapas de suscetibilidade à inundações, ações antrópicas, erosão linear e erosão laminar classificados em graus de vulnerabilidade que são de I (Muito Baixa) a V (Muito Intensa). Utilizou-se a Análise Hierárquica de Processos (Saaty, 1980) para integrar todos esses parâmetros, por meio de uma matriz de julgamentos (M), com a escala de importância mútua descrita na Tabela 3.6 e ilustrada na Equação 5.1.

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} P1 & P2 & P3 & P4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 1/2 & 1 & 2 & 3 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/3 & 1/2 & 1 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (5.1)$$

Em que,

“P1” mapa de suscetibilidade à ações antrópicas;

“P2” mapa de suscetibilidade à inundação;

“P3” mapa de suscetibilidade à erosão linear;

“P4” mapa de suscetibilidade à erosão laminar.

Para averiguar a consistência dos valores de importância mútua, Saaty (1980), propôs uma fórmula de razão de consistência (RC), em que a bibliografia recomenda valores menores que 0,1, para os pesos atribuídos na matriz da equação 5.1, o valor de RC foi igual, 0,011, logo os pesos atribuídos tem uma consistência válida.

Para elaboração da matriz de julgamento foram atribuídos maiores valores de importância mútua para o mapa de suscetibilidade às ações antrópicas, visto ser o dado com maior escala e analisado com maior detalhamento, obtido à partir dos 4 mapas de uso e cobertura do solo. Segundo o conceito proposto por Tagliani (2003) e adotado para este estudo, a vulnerabilidade ambiental é a susceptibilidade de um ambiente a um impacto potencial causado por alguma atividade antrópica. Logo, atribuindo uma maior importância ao mapa de suscetibilidade às ações antrópicas é possível analisar as áreas em que há risco na expansão urbana devido a fragilidade ambiental intrínseca existente na região.

O segundo fator com maior importância foi o mapa de suscetibilidade à inundação, por possuir uma escala maior que os mapas de erosão laminar e linear, e se tratar de um risco grande às áreas urbanas que apresentam tendência a urbanizar-se em direção a essas áreas de risco; em seguida foi atribuída maior importância à erosão linear, pela constatação de voçorocas na área de estudo.

Os pesos obtidos para os 4 parâmetros, segundo a matriz de julgamentos, e usados posteriormente para integração dos parâmetros pela ferramenta de álgebra de mapas do ArcGIS 10.6, *Raster Calculator*, constam na Equação 5.2.

$$Vul. Amb. = (0,467 * P1) + (0,277 * P2) + (0,160 * P3) + (0,095 * P4) \quad (5.2)$$

O resultado da Equação 5.2, o mapa de vulnerabilidade ambiental devido à expansão urbana, está expresso na Figura 5.13.

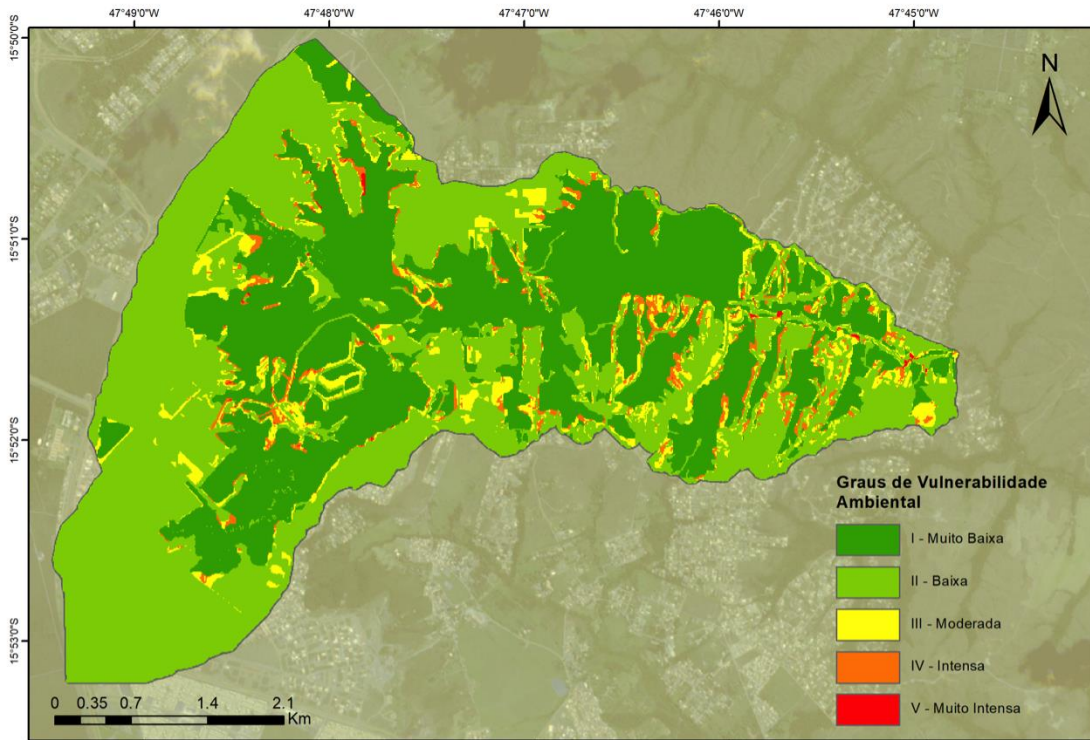


Figura 5.13: Mapa de Vulnerabilidade Ambiental devido à expansão urbana.

Nas áreas de vulnerabilidade ambiental muito intensa (em vermelho), observa-se a expansão urbana em regiões com uma fragilidade ambiental intrínseca, ou seja, zonas com risco de inundação (leito maior do ribeirão), processos erosivos intensos, declividade e riscos de desmoronamento.

O Mapa de Vulnerabilidade Ambiental devido à expansão urbana pode subsidiar zoneamentos urbanos, a constatação de áreas em que a expansão urbana apresente riscos para os moradores e aumente a degradação ambiental. Observa-se que as áreas de maior vulnerabilidade estão em áreas de expansão urbana mais recente, que ocorrem em áreas ambientalmente frágeis, enquanto as áreas com expansão urbanas já consolidadas estão, em sua maioria, em área de baixa vulnerabilidade ambiental.

6) CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados encontrados para o mapa de vulnerabilidade à expansão urbana podem ser utilizados como ferramenta de apoio à tomada de decisão no auxílio ao planejamento urbano desta região, com objetivo principalmente de garantir a seguridade dos habitantes da área de estudo frente aos riscos ambientais possíveis.

A metodologia para determinação de áreas suscetíveis à inundação com aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos garantiu uma maior confiabilidade nos dados de inundação e permitiu atribuir maior peso na equação da AHP a essa classe e uma análise consistente das áreas em que o risco de inundação pode afetar os habitantes da área de estudo.

A progressão das classes solo exposto e zona urbana, no mapa de áreas suscetíveis às ações antrópicas permitiram uma análise mais sensível das áreas de ocupação mais recentes, que na presente análise estão em áreas com maior vulnerabilidade.

É recomendado para próximas pesquisas uma maior atenção com o mapa de uso e cobertura do solo, o mais importante para a presente análise, com a divisão em classes mais específicas, de acordo com a densidade da zona urbana, a densidade e diversidade do cerrado, os tipos de agricultura presentes no local. É importante também o uso de imagens com maior resolução espacial, como levantamentos com drones, ou imagens de sensores remotos com menor *pixel*.

Para análise de áreas inundáveis o uso de um modelo numérico de terreno com maior resolução espacial também apresentaria resultados mais precisos, principalmente quanto à altura das colunas de inundação e o detalhamento das seções de corte do relevo. A disponibilidade de dados de estações fluviométricas seriam um diferencial à análise. Recomenda-se uma análise na integralidade do Ribeirão Taboca, que possui uma estação fluviométrica com dados dos últimos 10 anos.

No dia 26 de março de 2019 foram abertos editais para a venda direta para a regularização de sete (7) condomínios localizados na área da bacia de estudo. O Mapa de Vulnerabilidade Ambiental devido à expansão urbana poderá ser um auxílio à identificação da qualidade dos lotes quanto à segurança dos habitantes e os impactos no meio no meio ambiente, por parte da TERRACAP e das Administrações dos condomínios quanto aos respectivos licenciamentos ambientais de cada, e gerenciamento do uso do solo interno, principalmente se for acompanhado por uma etapa de validação de campos e dados com maior escala.

A metodologia pode ser replicada para as bacias do Distrito Federal e da Região Integrada do Distrito Federal e Entorno (RIDE), não somente para a vulnerabilidade ambiental devido à expansão urbana, mas também em outros casos, como em atividades agrícolas, regiões próximas a reservatórios, mineração, e até mesmo na análise de cenários para calcular e prever impactos do desmatamento em áreas que se encontram conservadas, ou diversos outros cenários e uso e cobertura do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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: DE CARVALHO, J. C.; GITIRANA JUNIOR, G. F. N.; CARVALHO, E. T. L. (2012). Tópicos sobre infiltração: teoria e prática aplicadas a solos tropicais. 1ed. Brasília: Universidade de Brasília, v. 4, p. 581-606.

ALMEIDA, W. S.; DINIZ, M. S.; DA SILVA, L. S. *et al.* (2017). Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas. 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.14, p.287-90.

BAPTISTA, G.M.M. (1997). Diagnóstico Ambiental da Perda Laminar de Solos, no Distrito Federal, por meio do Geoprocessamento. Dissertação de Mestrado, Publicação MTARH.DM-001A/97, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (2012). Conservação do Solo. 8ª ed. São Paulo: Ícone, 355p.

BIMBI, E. (2004) Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia. Revista Confea. Disponível em: <http://www.confea.org.br/revista/materiais>.

BRINK, A. B.; MABBUTT, J. A.; WEBSTER, R. (1966). *Report of the working group on land classification and data storage. hampshire, UK: Military Experimental Establishment Report*, n. 940. 97 p.

BURROUGH, P. A.; McDonnell, R. A. (2010). “*Principles of Geographical Information Systems*”. 3th ed. Oxford University Press, Oxford, U.K., 333p.

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.

CAMAPUM C.J., REZENDE, L.R. CARDOSO, F.B.F., LUCENA, L.C.F.L., GUIMARÃES, R.C. & VALENCIA, Y.G. (2015). Tropical soils for highway construction: peculiarities and considerations. *Transportation Geotechnics*, v. 5: pp. 3–19.

CHOW V. T. (1988) Applied Hydrology. 1ª ed. New York, McGraw Hill.

CORREIA, E. F. G.; RIBEIRO, G. P.; BAPTISTA, A. C. (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.

CORREIA, V. R. M.; MONTEIRO, A. M. V.; CARVALHO, M. S.; WERNECK, G. L. (2007). Uma aplicação do sensoriamento remoto para a investigação de endemias urbanas. Cadernos de Saúde Pública. Rio de Janeiro, v. 23, n. 5, p. 1015-28.

CREPANI, E. *et al.* (2001) Curso de Sensoriamento Remoto Aplicado ao Zoneamento Ecológico-Econômico e ao Ordenamento Territorial. São José do Campos: Inpe. INPE-8454-RPQ/722.

CREPANI, E.; DE MEDEIROS, J. S.; PALMEIRA, A. F.; DA SILVA, E. F. (2008) Zoneamento Ecológico-Econômico. In: FLORENZANO, T. G. (2008). GEOMORFOLOGIA conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos. São, cap.10, p.285-316.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ Fº, P. FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; e BARBOSA, C. C. F. (2001). Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico – econômico e ao ordenamento territorial. Ministério da Ciência e Tecnologia Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Apostila (INPE-8454-RPQ/722). São José dos Campos SP.

DA SILVA, G. B. S.; STEINKE, V. A. (2009). Alterações na paisagem e seus impactos diretos nas áreas de preservação permanentes das nascentes da bacia hidrográfica do ribeirão Taboca (DF): uma análise espaço-temporal 1964-2004. Caminhos de Geografia, [S.l.], v. 10, n. 32, jan. 2010. ISSN 1678-6343.

DA SILVA, Maria Sonia Lopes (1995). ESTUDOS DA EROSÃO, Petrolina - PE. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA

DA SILVA, T. A. (2013). Modelagem hidráulica do canal do rio granjeiro, Crato/CE, utilizando o programa computacional HEC-RAS. Dissertação - Msc. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza.

DE ALMEIDA FILHO, G. S. *et al.* (2015). EROSÕES LINEARES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DO PEIXE, SP. 15º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.

DE SOUZA FILHO, C. R.; CRÓSTA, A. P. (2003). GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À GEOLOGIA. Revista Brasileira de Geociências. Campinas, SP

EMBRAPA Cerrados. (2004). Mapa Pedológico Digital – SIG atualizado do Distrito Federal, escala 1:100.000 e uma síntese do texto explicativo. Planaltina - DF. 31p.

FERNANDEZ, P.; MOURATO, S.; MOREIRA, M. (2013). Comparação dos modelos HEC-RAS e LISFLOOD-FP na delimitação de zonas inundáveis. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. Volume 34. p.63-73.

FITZ, P. R. (2008). Geoprocessamento sem complicação. 1ª ed. São Paulo: Ed. Oficina de Textos. 158p.

GIMENES, F. B. Q.; OLIVEIRA FILHO, A. (2013). Mapas de fragilidade ambiental utilizando o processo de análise hierárquica (AHP) e sistema de informação geográfica (SIG). Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR.

GOLDSMITH, F. B. (1983) *Evaluating Nature*. In: WARREN A. E.; GOLDSMITH F. B. (1984). *Conservation in Perspective*. John Wiley and Sons, Chichester. pp. 233-246.

GUIMARÃES, R. F.; DE CARVALHO JUNIOR, O. A.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F. (2008) Movimentos de Massa. In: FLORENZANO, T. G. (2008). GEOMORFOLOGIA conceitos e tecnologias atuais. Oficina de Textos. São, cap.06, p.160-185.

IBGE (2010). Censo Demográfico da população brasileira. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>> Acesso em 21 de novembro de 2018.

INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2010). Tutorial de Geoprocessamento, São José dos Campos , SP

KAISER, E. A.; DAL OSTO, J. V.; FACCO, D. S. (2017). Influência da ação antrópica sobre processos erosivos e solapamento de margens no bairro Nova Santa Marta e Vila Bela Vista, Santa Maria-RS. XVII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Campinas, Brasil.

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.

LEONARDI, I. (2013). Companhia lança sistema GEO com softwares livres. Disponível em: <<https://mundogeo.com/blog/2013/05/20/companhia-lanca-sistema-geo-de-saneamento-com-softwares-livres/>>. Acesso em: 5 de novembro de 2018.

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

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, Publicação G.TD-060-09, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 312p.

MOREIRA, A A C. (2013). Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Granjeiro – Crato – CE Composição do Cenário Atual e Simulações de Uso e Ocupação do Solo. Dissertação - Msc. Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte.

NASCIMENTO, C. A. S; VIANNA, M. A.; RAMOS, D. A. L.; VILLELA, L. E.; FRANCISCO, D. N.; JUNIOR, R. I. (2018). A migração do campo para os centros urbanos no Brasil: da desterritorialização no meio rural ao caos nas grandes cidades. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v. 4, n. 5, Edição Especial, p. 2254-2272.

NUNES, F. G; FABRIZIA, G. N. (2007). A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DE VENTECHEW – 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.

PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (2003). Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Reimpressão. Porto Alegre: ABRH. 628 p.

PASSO, D.P. (2013). Análise da qualidade de classificadores para identificação de alvos urbanos em imagens de alta resolução espacial - uma aplicação com as imagens do satélite *worldview*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências Aplicadas, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106p.

PDAD – Pesquisa Distrital por Amostragem de Domicílios. (2016). Secretaria de Planejamento e Assuntos Econômicos (SEPLAN). Brasília. Distrito Federal. 54p.

PORTO, R. M. (2006). Hidráulica Básica. São Carlos. Ed. EESC-USP. 540p.

RATCLIFFE, D. A. (1971). *Criteria for the selection of nature reserves. Advancement of Sciences*, 27. pp. 294-296.

ROCHA, C. H. B. (2010). Geoprocessamento: tecnologia transdisciplinar. Juiz de Fora: Ed. Do Autor.

SAATY, T.L. (1980). *“The Analytic Hierarchy Process”*. McGraw-Hill, New York. 287p.

SAATY, T.L. (1991). Método de Análise Hierárquica. Tradução e Revisão Técnica Wainer da Silveira e Silva. São Paulo: Mcgraw-hill, Makron.

SANTOS, P.; MOULIN, A. S. (2010). Urbanização Brasileira. Um Olhar Sobre o Papel das Cidades Médias na Primeira Década do Século XXI. *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 12, n. 2. p. 103-119.

SMITH, P.G.; NELSON, J.G.; THEBERGE, J.B. (1986). *Planting Environmentally Significant areas in the Northwest Territories. University of Waterloo, Heritage Resources Centre, Occasional Paper n° 7*. Waterloo. Ontario.

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, C. E. M. (2007). Inundações urbanas. Porto Alegre: ABRH/RHAMA.

TUCCI, C. E. M. (2009) Hidrologia: ciência e aplicação. 4. Ed. Porto Alegre: UFRGS. 943 p. Coleção ABRH.

WISCHMEIER, W.H.; Smith, D.D. (1978). *“Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning”*. U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C. 58p.

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.

ZINGG, A.W. (1940). Degree and length of land slope as it affects soil loss in runoff. *Agric. Eng.*, v.21, p. 59-64.