

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

AVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCOS
AMBIENTAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO CÓRREGO DA LAGOINHA - DF

HUGO VOGT VOLKMER
ORIENTADOR: WAGNER SANTOS DE ALMEIDA, DSc

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: JULHO/2018

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

AVALIAÇÃO DE ÁREAS DE RISCOS
AMBIENTAIS NA BACIA HIDROGRÁFICA
DO CÓRREGO DA LAGOINHA – DF

HUGO VOGT VOLKMER

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

WAGNER SANTOS DE ALMEIDA, DSc (UnB)

(ORIENTADOR)

CARLOS HENRIQUE RIBEIRO LIMA, DSc (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, DSc (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 3 JULHO DE 2018.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VOLKMER, H.V. (2017). *Avaliação de áreas de riscos ambientais na bacia hidrográfica do Córrego da Lagoinha - DF*. Monografia de Projeto Final 2, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 69 p.

CESSÃO DE DIREITOS

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.

“Sede como os pássaros que, ao pousarem um instante sobre ramos muito leves,
sentem-nos ceder, mas cantam! Eles sabem que possuem asas.”

Victor Hugo

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, àqueles que proveram auxílio imensurável e que nunca mediram esforços para amparar: minha família, a qual tenho o privilégio de fazer parte.

Agradeço a Deus pela oportunidade de fazer parte do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, onde vivi os melhores anos de minha vida.

Aos professores que ofereceram apoio durante a elaboração desta monografia: prof. Manoel, prof. Leonardo, prof. Eleudo, prof. Lenildo, prof. Conceição e prof. Cristina.

Ao meu orientador, prof. Wagner, por tantas oportunidades proporcionadas e, principalmente, por toda a confiança depositada.

Finalmente, agradeço à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal, pelo apoio ao trabalho desta monografia, acordo Processo Nº 0193-001.362/2016.

RESUMO

Processos naturais potencializados por ação antrópica podem gerar consequências negativas no que se refere à ocupação de uma bacia hidrográfica. A ocupação antrópica desordenada em bacias hidrográficas, principalmente as localizadas nas periferias de centros urbanos, vem intensificando a ocorrência de processos erosivos e de compactação do solo aumentando, assim, as áreas de inundação. Este projeto final de graduação em Engenharia Ambiental tem por objetivo propor uma metodologia de avaliação de risco ambiental, que envolva uma análise do uso e cobertura do solo para a delimitação das áreas que oferecem maior risco dentro de uma bacia hidrográfica, com vistas à subsidiar um ordenamento territorial mais adequado e identificar as áreas mais propensas à ocorrência de processos erosivos e de inundação. Para atingir o objetivo proposto foi realizada a produção de mapas de uso e cobertura solo para o ano de 2017 na área de estudo, a partir da utilização de algoritmos de geoprocessamento e de processamento de imagens de sensores remotos; bem como, a obtenção de mapa de vulnerabilidade ambiental relacionado aos processos estudados para o ano de 2017, tendo por base a aplicação de análise multicritério como a Análise Hierárquica de Processos (AHP) na produção de mapas de suscetibilidade a processos erosivos laminares e lineares (Geoindicadores) e de áreas de inundação por meio de modelagem hidrológica com o sistema HEC-GeoRAS. Ao final, a metodologia de avaliação de risco ambiental das áreas mais propensas à ocorrência de processos erosivos e inundações permitirá a produção de mapas com as áreas de susceptibilidade a esses processos, com indicação das áreas de maior risco na bacia hidrográfica estudada. Desta maneira, pretende-se subsidiar o ordenamento territorial por parte dos gestores públicos, e propor medidas mitigadoras às áreas com susceptibilidade e que já estejam sendo ocupadas atualmente.

Palavras-chaves: modelagem ambiental, riscos, inundações, EUPS, HEC-RAS, HEC-HMS, Método *Ven Te Chow*, hidrologia, ordenamento territorial, erosão linear, erosão laminar e geoprocessamento.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS DA PESQUISA	3
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1.	IMPACTO AMBIENTAL	4
3.2.	OCUPAÇÃO IRREGULAR	4
3.3.	EROSÃO E SUA IMPLICAÇÃO.....	5
3.4.	CLASSIFICAÇÃO DE EROSÕES PLUVIAIS	6
3.5.	CONDICIONANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS	8
3.6.	HEC-HMS (<i>Hydrologic Modeling System</i>).....	10
3.7.	MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA CHUVA DE PROJETO	11
3.7.1	Método Ven Te Chow	11
3.8.	HEC-RAS.....	15
3.9.	HEC-GEORAS.....	16
3.10.	ENCHENTE E INUNDAÇÃO	16
3.11.	SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIG.....	18
3.12.	USO E COBERTURA DO SOLO	18
3.13.	MÉTODOS UTILIZADOS PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS ...	20
3.13.1.	Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS.....	20
3.13.2.	Modelo qualitativo baseado em geoindicadores para avaliação da erosão linear	23
3.14.	ÁREAS DE RISCO À INUNDAÇÃO.....	26
3.15.	ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP).....	27
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
4.1.	ÁREA DE ESTUDO	28
4.2.	MATERIAIS	31
4.2.1.	Imagens	31

4.2.2.	Produtos Cartográficos	32
4.2.3.	Modelo Digital de Terreno	34
4.3.	METODOLOGIA	35
4.3.1.	Mapa de Uso e Cobertura do Solo	36
4.3.2.	Mapa de Susceptibilidade à Erosão Linear	37
4.3.3.	Mapa de Susceptibilidade a Erosão Laminar.....	38
4.3.4.	Mapa de Susceptibilidade a Erosão Linear	39
4.3.5.	Mapa de Áreas de Inundação.....	41
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1.	MAPA TEMÁTICO DE USO E COBERTURA DO SOLO.....	46
5.2	ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROSÃO LINEAR	47
5.3	ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROSÃO LAMINAR	51
5.4	ÁREAS SUSCEPTÍVEIS ÀS INUNDAÇÕES	53
6.	CONCLUSÕES	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação dos leitos do rio e da planície de inundação.	17
Figura 2. Passos utilizados para a geração do mapa de suscetibilidade à erosão linear. Fonte: Adaptado de Campagnoli (2002).	24
Figura 3. Localização da área de estudo - Microbacia do córrego da Lagoinha.	29
Figura 4. Localização da área de estudo (Microbacia do Ribeirão Lagoinha) em relação às Regiões Administrativas do DF. Fonte: Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habilitação.....	30
Figura 5. Localização da área de estudo (Microbacia do córrego Lagoinha). Fonte: Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habilitação.....	30
Figura 6. Avenida do setor Sol Nascente. Detalhe para a imensa quantidade de sedimentos e lixo. Fonte: G1, 2018.	31
Figura 7. Voçoroca a 30 metros da Rua 16, Sol Nascente. Fonte: G1, 2018.	31
Figura 8. Recorte do mosaico dentro dos limites da área de estudo através do Software ENVI.....	32
Figura 9. Mapa pedológico utilizado nos mapas de susceptibilidade à erosão.	33
Figura 10. Mapa geológico utilizado nos mapas de susceptibilidade à erosão.	34
Figura 11. Modelo Digital de Terreno obtido a partir das curvas de nível de 5m.....	35
Figura 12. Etapas para elaboração do mapa das áreas de inundação.	41
Figura 13. Mapa da cobertura superficial, seguindo a classificação descrita pelo <i>Soil Conservation Service</i> , do terreno da microbacia do córrego da Lagoinha.....	42
Figura 14. Delimitação do canal e demais parâmetros no software HEC-GeoRAS	44
Figura 15. Quinta seção transversal a partir de montante do córrego da Lagoinha após simulação de inundação.....	45
Figura 16. Mapa de Uso do Solo para a microbacia do córrego da Lagoinha no ano de 2017.	46
Figura 17. Quadro de áreas referente ao mapa Geopedológico da microbacia do córrego da Lagoinha. Os valores estão em Km ²	47
Figura 18. Mapa Geopedológico obtido para a área de estudo	48
Figura 19. Mapa de declividade reclassificado a partir do MDT/Curvas de Nível.	49
Figura 20. Mapa de suscetibilidade à erosão linear da área de estudo.	50
Figura 21. Fatores componentes da EUPS obtidos.	52
Figura 22. Mapa de suscetibilidade à erosão laminar da área de estudo.	52

Figura 23. Mancha de inundação encontrada para a microbacia do córrego da Lagoinha.	54
Figura 24. Residências atingidas pela simulação da mancha de inundação do córrego da Lagoinha.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores de CN em função da cobertura superficial do terreno e dos grupos hidrológicos de solos. Modificado e adaptado de TUCCI <i>et al.</i> (1995).....	13
Tabela 2. Fator de Redução do Tempo do Pico de Vazão. Fonte: WILKEN (1971).....	14
Tabela 3. Escala de vulnerabilidade à intemperismo e erosão das rochas mais comuns. (Crepani et al., 2001).	25
Tabela 4. Critério adotado para os atributos do cruzamento matricial realizado para a obtenção do mapa de suscetibilidade à erosão linear (Adaptado de Campagnoli, 2002).	26
Tabela 5. Valores de erodibilidade (K) para os tipos de solo existentes na área de estudo (Adaptado de Bertoni & Lombardi Neto, 1990).....	38
Tabela 6. Pesos atribuídos para os fatores C e P (adaptado de Almeida <i>et al.</i> 2012).....	39
Tabela 7. Classificação dos solos da área de estudo.....	39
Tabela 8. Classificação geológica da área de estudo.....	40
Tabela 9. Atributos para a geração do mapa geopedológico da área de estudo (Adaptado de Campagnoli, 2002).....	41
Tabela 10. Valores de precipitação excedente e demais parâmetros encontrados pelo Software HEC-HMS.....	43
Tabela 11. Valores de área em km ² para cada uma das classes temáticas consideradas e suas respectivas porcentagens em relação ao quadro de áreas.	47
Tabela 12. Declividade da bacia da microbacia de córrego da Lagoinha.	49

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
AHP	Análise Hierárquica de Processos
ANA	Agência Nacional de Águas
APP	Área de Preservação Permanente
AHP	Análise Hierárquica de Processos
ANA	Agência Nacional de Águas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
C	Fator de uso e manejo do solo
CN	<i>Curve Number</i>
DF	Distrito Federal
DN	Número Digital
DVI	Índice de Vulnerabilidade DRASTIC
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FOSM	<i>First Order Second Moment</i>
EPA	Agência de Proteção ao Meio Ambiente
ha	Hectares
HEC-RAS	<i>Hydrological Engineering Centers River Analysis System</i>
HEC-HMS	<i>Hydrological Engineering Hydrologic Modeling System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
IVDN	Índice de Vegetação de Diferença Normalizada
K	Fator de erodibilidade dos solos
Km	Quilômetro(s)
m	Metro(s)
LEL	Limite de Explosividade Inferior
LEGAL	Linguagem Espacial para Geoprocessamento Algébrico
LS	Fator topográfico
MDT	Modelo Digital de Terreno
METRIC	<i>Mapping Evapotranspiration a High Resolution and with Internalized Calibration</i>
MMA	Ministério do Meio Ambiente

R	Fator de Erosividade da Chuva
S	Parâmetro de tipo de solo
SEGETH	Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habilitação
SIEG	Sistema Estadual de Geoinformação
SIG	Sistema de Informação Geográfica
TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
UFMG	Universidade de Minas Gerais
UNB	Universidade de Brasília
UNESP	Universidade Estadual de São Paulo
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

1. INTRODUÇÃO

As cidades brasileiras têm passado por um processo acelerado de mudanças em seu sistema urbano, fruto de um elevado crescimento populacional. Em decorrência da rapidez desse processo de crescimento antrópico, muitas vezes de forma desordenada, há comprometimento na elaboração de planejamentos com ordenamentos territoriais adequados, o que acarreta problemas socioambientais diversos. O aumento da ocupação populacional em uma bacia hidrográfica de forma desordenada causa efeitos no seu escoamento superficial, na impermeabilização do seu solo e, conseqüentemente, no aumento da área de inundação a partir das margens do canal fluvial. Além disso, a ocupação desordenada induz processos erosivos de forma mais acelerada, ao passo que retira grande parte da cobertura vegetal existente.

Embora alguns desastres sejam fenômenos naturais, fatores externos relacionados à ocupação antrópica interferem diretamente na ocorrência ou agravamento destes (Sidler e Ochiai, 2006). Um dos principais fatores é a ocupação urbana desordenada de encostas e a degradação ambiental decorrente da retirada de vegetação nativa ao processo de urbanização informal e descontrolada. No Brasil, após os diversos desastres de queda de encostas por ação da chuva nas áreas urbanas, foi promulgada a Lei 12.608, de 10 de abril de 2012 que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC, dispôs sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC e autorizou a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres (Brasil, 2012).

Para a previsão dos processos erosivos faz-se primordial, como referido por Macêdo (2009), o conhecimento das condicionantes que interferem nessa dinâmica como a geologia, a topografia do terreno, a pedologia, as condições climáticas, os tipos de uso e cobertura do solo e as práticas conservacionistas adotadas na bacia hidrográfica estudada. Dentre esses fatores, o que possui maior variação espaço-temporal é o uso e cobertura do solo, assim sendo, é o que pode ser monitorado e/ou modificado para a prevenção e controle dos processos erosivos.

Ainda se referindo a impactos ambientais potencializados pela ocupação irregular, como foi observado em DAEE (2006), as inundações são fenômenos que guardam relação direta com processos de erosão e de impermeabilização dos terrenos, ambos são consequência direta da ação antrópica e, particularmente, dos processos de urbanização.

Isto posto, é interessante, do ponto de vista da compreensão do planejamento territorial, relacionar os principais fenômenos que atribuem riscos a uma determinada região.

O Setor Habitacional Sol Nascente localiza-se na região administrativa de Ceilândia, no Distrito Federal, e vem sofrendo com processos erosivos intensos nos últimos anos. Supõe-se que esses processos possuem ligação direta com a ocupação antrópica desprovida de planejamento territorial e urbano que ocorre no local.

Neste estudo procura-se avaliar as condições de tipos de solo e declividade de terreno para elaboração de mapas que identificam as possíveis áreas de risco de inundações e erosão na bacia hidrográfica onde se localiza o Setor Habitacional Sol Nascente, com o intuito de mitigar possíveis danos causados por esses fenômenos naturais. Por fim, esse trabalho possui o poder de auxiliar no planejamento da ocupação futura dessa área de forma racional e ordenada, através da delimitação das áreas susceptíveis à inundação e a processos erosivos laminares e lineares.

A Metodologia adotada, baseada em estudos similares que se mostraram eficientes na convergência com o objetivo proposto no presente estudo, pode ser replicada para os demais Municípios constantes da RIDES, subsidiando o seu planejamento urbano.

O texto do presente trabalho é dividido da seguinte forma: introdução, que possibilita uma visão geral do projeto; objetivos gerais e específicos; fundamentação teórica, na qual é disposto todo o histórico, contexto e importância da adoção das metodologias utilizadas; capítulo com os materiais e métodos, no qual se trabalha a aplicação detalhada de todas as metodologias adotadas; análise e discussão dos resultados e por fim as conclusões obtidas, trazendo as recomendações e diretrizes gerais acerca dos resultados.

2. OBJETIVOS DA PESQUISA

3.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste projeto final é avaliar áreas de riscos na bacia hidrográfica do córrego Lagoinha-DF, pela modelagem de parâmetros hidrológicos e pela avaliação do uso e cobertura do seu solo, e executar uma análise de sensibilidade da relação entre a dinâmica de uso e cobertura do solo e a sua influência no escoamento superficial, além da susceptibilidade à erosões.

3.2. Objetivos Específicos

Com o propósito de alcançar objetivo geral, foram delimitados os seguintes objetivos específicos na área de estudo:

- i) Determinar as áreas de maior susceptibilidade a processos erosivos por meio de análise hierárquica de processos – AHP.
- ii) Determinar as áreas de maior susceptibilidade às inundações por meio de modelagem hidrológica com os softwares HEC-HMS e HEC-GeoRAS.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1.IMPACTO AMBIENTAL

Segundo o artigo 1º da Resolução nº 01/1986 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), citado por Miranda (2010), o Impacto ambiental pode ser definido como qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia, resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetam: a saúde, a segurança e o bem estar da população; as atividades sociais e econômicas; a biota; as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente e a qualidade dos recursos ambientais, resultam modificações significativas no meio

3.2.OCUPAÇÃO IRREGULAR

O parcelamento do solo é o instituto jurídico pelo qual se constrói o mosaico do tecido urbano, que é a da urbanização. Entretanto, é fato notório, parte do território urbano do País tem se constituído mediante parcelamento irregular do solo. São os chamados “loteamentos clandestinos”, empreendimentos realizados à margem da legislação urbanística, ambiental, civil e penal, em que se abrem ruas e demarcam lotes sem qualquer controle do Poder Público.

Deste modo, são criados pontos de instabilização da encosta (cortes íngremes e aterros lançados) pela ausência de técnicas adequadas para a implantação de moradias, devido, entre outras causas, a falta de sistema de drenagem urbana, o que acarreta às águas servidas e pluviais descenderem indisciplinadamente ao longo da encosta; a presença de erosões; o lançamento de lixo e de entulho nas encostas pelos próprios moradores por não serem convenientemente orientados ou por inexistir coleta regular de resíduos sólidos.

À medida que ocupação desordenada cresce, potencializam-se os problemas. Observam-se trincas no terreno e rachaduras nas paredes das casas, surgimento de minas d'água, tanto por elevação do grau de saturação do solo por meio de infiltrações, como por vazamentos de fossas sanitárias. Notam-se as primeiras ocorrências de deslizamentos, de escorregamentos e de surgimento de voçorocas (oriundos de processos erosivos), com potencialização do risco à vida humana.

3.3.EROSÃO E SUA IMPLICAÇÃO

O termo erosão, proveniente do latim *erodere*, pode ser definido como um conjunto de processos pelos quais os materiais terrosos e rochosos da crosta terrestre são desagregados, desgastados ou dissolvidos e transportados pela ação dos agentes erosivos (IPT, 1986). Os principais agentes erosivos dinâmicos naturais são: a água, o vento, a gravidade, a neve, a ação dos micro-organismos e outros eventos naturais (tremores de terras, degelo, dentre outros), causadores de deslocamentos de massas de solo (Carvalho, 2001). Por outro lado, estão os agentes oriundos das ações antrópicas, que aceleram o desgaste e a perda de solo, tais como: aberturas de estradas, desmatamentos, atividades agrícolas, pastagem, mineração e mudança no regime natural do fluxo de água.

Assim, a erosão laminar e a linear surgem do escoamento da água que não se infiltra, associada ao transporte, seja das partículas ou agregados despedidos do maciço pelo impacto das gotas da chuva, seja das partículas ou agregados arrancados pela força trativa desenvolvida entre a água e o solo. O poder erosivo da água em movimento e sua capacidade de transporte dependem da densidade e da velocidade de escoamento, bem como da espessura da lâmina d'água e, principalmente, da inclinação da vertente do relevo. A formação de filetes no fluxo superficial amplia o potencial de desprendimento e arraste das partículas de solo acarretando, quase sempre, sulcos que evoluem para ravinas podendo chegar à condições de voçoroca (Camapum de Carvalho *et al.* 2006)

A erosão é um importante fenômeno a ser estudado por intervir em diferentes áreas e sistemas, como foi abordado por Carvalho (2008), como na agricultura, em que o entendimento desse processo é primordial para a conservação dos solos; além disso, também na proteção de obras civis, tais como: estabilidade de taludes, construção de estradas, regularização dos cursos d'água e proteção de margens de rios e de reservatórios.

Desse modo, seu estudo justifica-se por razões sociais e econômicas, pois a erosão é uma das principais causas responsáveis pela a perda anual de milhões de toneladas de solo fértil, principalmente devido às práticas inadequadas de uso e ocupação do solo. No presente estudo, o estudo da erosão tem como foco principal os prejuízos sociais e ambientais gerados por esse processo e agravados pela ocupação urbana desordenada que ocorre, na maioria dos casos, sem a adoção de um sistema de drenagem efetivo, como é o caso do Complexo Habitacional Sol Nascente na área de estudo.

Em casos como esse, os processos erosivos são agravados pelo crescimento desordenado das áreas urbanas. Ao ocupar o território de forma ilegal, os moradores de condomínios irregulares e invasões inserem concreto e cimento onde antes havia vegetação natural. Sem ter como infiltrar no solo e recarregar o lençol freático, a água escorre pela superfície à procura dos pontos mais baixos do relevo, e na sua trajetória arrasta o que encontra, assim, a ocupação do solo precisa ser planejada, e a falta de um sistema de captação de drenagem urbana adequado agrava os problemas de escoamento superficial.

Os processos erosivos podem ser classificados de acordo com seus agentes erosivos, como é o exemplo das erosões pluvial, fluvial, marinha, eólica, gravitacional e glacial. O presente estudo objetiva analisar a erosão pluvial, por ser essa a mais comprometidora no caso da bacia escolhida.

3.4. CLASSIFICAÇÃO DE EROSÕES PLUVIAIS

A erosão poderia ser classificada como referido por Camapum et al. (2006) baseando-se na forma como surgiu em: erosão natural/geológica, que ocorre na superfície terrestre em equilíbrio com a formação dos solos ao longo do tempo geológico e, em erosão antrópica/acelerada, que se dá devido as atividades humanas em uma escala de tempo muito menor.

No entanto, é mais frequente que as erosões sejam classificadas em: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica, sendo que a erosão desencadeada pela ação das águas das chuvas, a erosão hídrica, é a que mais ocorre no Brasil, e conseqüentemente, a que ocasiona maiores prejuízos econômicos, sociais e ambientais no País.

A erosão hídrica pode ser subdividida em erosão pluvial, fluvial e marinha. Tendo em vista a não existência de oceanos nas proximidades da área de estudo e a distância do Complexo Habitacional Sol Nascente na área de estudo em relação a corpos hídricos, o presente estudo dará maior atenção a processos erosivos fluviais. A erosão hídrica pluvial pode se manifestar de forma linear ou laminar.

A erosão laminar consiste na remoção de delgadas camadas de solo e, portanto, não se fazendo notar sua ação com facilidade. Origina-se do escoamento superficial disperso pela encosta, não se concentrando em canais e ocorre, quase sempre, sob condições de chuva prolongada, quando a capacidade de infiltração do solo é excedida. O aumento da

turbulência do fluxo de água provoca uma maior capacidade erosiva. Esse tipo de erosão tende a ocorrer com maior facilidade em solos com baixo poder de coesão (Guerra, 1995). Para Ellison (1947), esse tipo de erosão raramente desenvolve capacidade suficiente para transportar quantidade significativa de solo em suspensão. Sua capacidade de transporte aumenta com a energia cinética fornecida pelas gotas de chuva, que dão origem a um fluxo turbulento e se constitui na interação do impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial.

Havendo escoamento superficial pode ocorrer erosão linear, que pode se apresentar de três formas: sulcos, ravinas e voçorocas, e é caracterizada como sendo a erosão provocada pela concentração das linhas de fluxo das águas, resultando em cortes na superfície do terreno que posteriormente podem evoluir para a formação de ravinas e voçorocas (SALOMÃO, 1999).

A erosão em sulcos ocorre em pequenas irregularidades do terreno, nas quais a enxurrada se concentra, levando à formação de filetes que se escoam seguindo aproximadamente a linha de maior declividade da encosta (Fournier, 1960). À medida que a lâmina torna-se mais espessa e aumenta a velocidade, cresce também o poder erosivo e, a certa distância do topo da vertente, a tensão de cisalhamento supera a resistência ao cisalhamento, iniciando-se a erosão (Horton, 1945).

A erosão em ravinas dá origem a feições mais visíveis e permanentes no solo, ocorre a partir do momento em que a velocidade do fluxo concentrado excede os 30 cm/s (Ellison, 1947), quando este adquire um regime turbulento e origina-se uma incisão ao longo da linha de fluxo (Evans, 1980). O aumento do gradiente hidráulico pode ser devido ao aumento da intensidade da chuva, ao aumento do gradiente de encosta e ainda porque a capacidade de armazenamento foi excedida. O canal formado não é funcional e seu talvegue é intermitentemente aprofundado, atingindo inicialmente os horizontes inferiores do solo e, em seguida, a rocha mãe (Fournier, 1960). Excepcionalmente uma ravina pode evoluir para um canal de água permanente, desembocando em um rio; quando isto ocorre, em geral a ravina já evoluiu para uma voçoroca (Guerra, 1995).

A erosão em voçoroca, segundo Guerra (1995), apresenta características erosivas relativamente permanentes nas encostas, possuindo paredes laterais íngremes e, em geral, fundo chato, ocorrendo fluxo de água no seu interior durante os eventos chuvosos e, em alguns casos, podem atingir o lençol freático. Podem se originar da intensificação do processo de ravinamento, tanto no sentido vertical como horizontal, concentrando

grandes volumes de fluxo das águas do escoamento superficial e do escoamento subsuperficial. A água é transportada em dutos que, com remoção de grandes quantidades de sedimentos, provocada pelo aumento do fluxo subsuperficial, aumenta o diâmetro desses dutos e provoca o colapso do material situado acima. Pode ainda ser a partir de antigos deslizamentos de terra, que deixam cicatrizes nas paredes laterais do mesmo e com a ação posterior do escoamento concentrado, se origina o voçorocamento. Embora a origem da formação da voçoroca possa variar, o processo, de forma geral, é uma conjugação da ação do escoamento superficial das águas pluviais e do escoamento subsuperficial.

Alguns processos naturais e antrópicos tem o poder de intensificar os processos erosivos, o que acentua a gravidade destes, causando prejuízos significativos ao uso do solo e a estabilidade dos taludes, como é o caso das voçorocas.

3.5. CONDICIONANTES DOS PROCESSOS EROSIVOS

A erosão pode ser descrita como sendo um processo contínuo que ocorre em consequência da ação de agentes erosivos responsáveis pelo transporte de materiais sólidos. De maneira natural, a água é o principal agente erosivo. Contudo, existem outros fatores que condicionam os processos erosivos. No presente estudo, daremos relevância aos principais, são eles: declividade do terreno, clima, pedologia e uso e cobertura do solo.

A declividade, ou grau de inclinação do terreno, influencia diretamente na concentração, na dispersão e na velocidade da enxurrada e, em consequência, no maior ou menor arrastamento superficial das partículas de solo. Nos terrenos planos, ou apenas levemente inclinados, a água escoar com pequena velocidade e, além de possuir menos energia, tem mais tempo para infiltrar-se, ao passo que, nos terrenos muito inclinados, a resistência ao escoamento das águas é menor e, por isso, elas atingem maiores velocidades. As regiões montanhosas são, portanto, as mais suscetíveis à erosão hídrica (Lepsch, 2010).

A precipitação, por sua vez, é o principal condicionante dos processos erosivos hídricos pluviais ou laminares, pois o impacto da chuva no solo favorece o desprendimento das partículas do solo, além do fato da água também atuar como um agente de transporte dessas partículas. A ação erosiva da chuva depende da intensidade, duração e frequência com que ocorre.

Outro fato em relação ao clima é sua considerável influência na ação do intemperismo, fenômeno que predispõe os materiais à ação dos processos erosivos. No Brasil, por ser uma região de clima tropical, as condições de umidade e temperatura favorecem a ação dos processos físico-químicos como a oxidação, redução e a dissolução de minerais e rochas (Macêdo, 2009).

O solo é um fator condicionante, pois, influencia na origem da erosão e também é afetado por ela. Há diferentes características do solo que o configuram em um grau maior ou menor de erodibilidade, termo conferido ao solo de acordo com a sua capacidade de resistir à erosão pluvial. Dentre essas características tem-se como exemplo a estrutura do solo, a composição, espessura, textura, granulometria e coesão.

Segundo Bertoni & Lombardi Neto (1999), a erosão não é a mesma em todos os solos, pois as propriedades físicas e as características químicas, biológicas e mineralógicas do solo exercem diferentes influências. A matéria orgânica presente em um solo, por exemplo, retém de duas a três vezes o seu peso em água, aumentando assim a sua capacidade de infiltração, com diminuição das perdas do solo por erosão laminar.

O principal fator desencadeador dos processos erosivos é a ação antrópica. A atuação do homem na modificação da paisagem tem configurado a aceleração dos processos erosivos em uma escala de tempo muito menor do que se elas ocorressem naturalmente. As áreas que naturalmente eram pouco ou não suscetíveis à processos erosivos têm apresentado sérios problemas devido, principalmente, às ações de perda da cobertura vegetal por desmatamento, queimadas, atividades agrícolas, pastagem, mineração, construção de estradas e outras obras civis que ocorram sem o planejamento adequado. Deste modo, faz-se necessária a elaboração de um mapa de uso e ocupação do solo, que abrange tanto a cobertura vegetal remanescente quanto o grau de antropização de uma bacia.

Sob a ótica do risco associado a processos naturais que se acentuam com o aumento da atividade antrópica em bacias, assim como a erosão existem outros processos que possuem condicionantes muito similares, contudo geram impactos ambientais distintos. Como exemplo disso tem-se as inundações, que acarretam riscos às bacias hidrográficas urbanizadas, como é o caso da microbacia do córrego da Lagoinha. Para dimensionar esse processo, cabe inicialmente entender o funcionamento da bacia hidrográfica em termos de escoamento superficial, área de inundação entre outros fatores. A modelagem hidrológica por meio do *software Hydrologic Modeling System - HEC-HMS* possibilita

esse entendimento e permite que o usuário refine seus dados para simular fenômenos como inundações e enchentes.

3.6. HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*)

O HEC-HMS foi desenvolvido pelo *United States Army Corps of Engineers* (USACE) e é gratuitamente disponibilizado. O HEC-HMS foi projetado para ser aplicado em uma ampla gama de áreas geográficas e avaliar o maior número possível de problemas, entre eles, o estudo de bacias hidrográficas de grandes rios, abastecimento de água, hidrologia de inundação e escoamento de áreas naturais ou pouco urbanizadas (Razi *et al.*, 2010). De forma simplificada, é uma ferramenta de simulação com uma variedade de modelos hidrológicos que consegue transformar eventos de precipitação em vazão, utilizando as características de cada trecho da bacia para a simulação.

Vários estudos acerca da integração dessas ferramentas vêm sendo publicado por autores nacionais e internacionais. Kneb *et al.* (2005) utilizaram modelo hidrológico (HEC-HMS) e hidráulico (HEC-RAS) integrado a um SIG na bacia hidrográfica do rio San Antônio, na região central do Texas-EUA, para um evento hidrológico.

Cabral *et al.* (2016) utilizaram informações de modelos hidrológicos, hidráulicos e SIG, no mapeamento de áreas inundáveis na parte média da bacia hidrográfica do rio Acaraú, no Estado do Ceará, evidenciando áreas susceptíveis e um mapeamento satisfatório, quando comparado com as marcas de cheias de inundação dos municípios.

Oliveira *et al.* (2010) utilizaram dados de sensoriamento remoto aninhado a técnicas de SIG, na espacialização das áreas de inundação da bacia hidrográfica do rio Caí no Rio Grande do Sul, mostrando um potencial da metodologia naquela região de estudo. Já Robaina *et al.* (2013) em seu trabalho utilizando dados oriundos de sensoriamento remoto e SIGs, evidenciaram regiões propícias às inundações na área urbana de Alegrete-RS, influenciada pelo rio Ibirapuitã, onde os autores identificaram áreas susceptíveis à inundações e alagamentos em vários bairros do município.

No presente estudo, o HEC-HMS será utilizado e modo a determinar parâmetros necessários à aplicação de uma metodologia que visa determinar a chuva de projeto e, conseqüentemente, a vazão de projeto da microbacia do córrego da Lagoinha para um determinado tempo de retorno.

3.7. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA CHUVA DE PROJETO

3.7.1 Método Ven Te Chow

O método proposto por Ven Te Chow tem sido utilizado em estimativas de vazões máximas, ou seja, das vazões de projeto para previsão de enchentes e elaboração de obras hidráulicas. A estimativa das vazões de projeto é feita com base nos dados de chuvas intensas que ocorrem na respectiva bacia em estudo. O método utiliza as hipóteses de hidrograma unitário, considerando que o fenômeno de transformação da chuva em vazão é regido por equações lineares. No método as vazões máximas são proporcionais às chuvas efetivas (NUNES F. G., 2007).

De acordo com Fendrich (2008), o método permite analisar a altura da chuva efetiva (P_e) considerando o tipo e cobertura do solo e a quantidade da chuva incidente. Assim para o cálculo da P_e foi empregado a fórmula utilizada no Método do *Soil Conservation Service* (SCS), dos Estados Unidos da América.

O método proposto por Ven Te Chow, conforme Nunes e Fiori (2007) estabelece que a chuva efetiva, denominada de chuva excedente é responsável pelas vazões de cheias principalmente em bacias de pequenas escalas e urbanizadas. Assim, a vazão máxima pode ser expressa pela Equação 1:

$$Q_{\max} = \frac{A.X.Y.Z}{3,6} \quad (1)$$

onde:

Q_{\max} = vazão máxima em m^3/s ;

A = área da bacia, sendo igual a 15,85 km^2 ;

X = fator de deflúvio, sendo igual a razão da precipitação excedente pela duração ($X = Re/td$);

Y = o fator climático, sendo igual a 1, já que a equação das chuvas intensas utilizada no trabalho;

Z = fator de redução do tempo de pico;

Uma vez que o fator de deflúvio “X” é a razão da chuva excedente pela duração, para o cálculo do excesso da chuva foi utilizada a fórmula do *Soil Conservation Service* - SCS, sendo aplicada somente após a determinação da chuva total e do número de deflúvio.

Precipitação Excedente (Re)

A precipitação excedente utilizada durante a aplicação do Método de Ven Te Chow foi calculada a partir da fórmula elaborada pelo *Soil Conservation Service* e reescrita no sistema métrico nacional por WILKEN (1971):

$$Re = \frac{(R - 5080/N + 50,8)^2}{R + 20320/N - 203,2} \quad (2)$$

onde:

Re = precipitação excedente dada em mm;

R = chuva total, dada em mm, sendo igual à relação de $i_m \cdot t_d$;

N = número de deflúvio que é considerado igual ao valor de CN.

Intensidade da Chuva (i_m)

A intensidade da chuva considerada na aplicação dos métodos que transformam precipitação em vazão é a intensidade máxima média observada num certo intervalo de tempo, para um período de retorno determinado, sendo um resultado do valor médio da chuva, no tempo e no espaço (TUCCI *et al.*, 1993).

A intensidade da chuva para todos os tempos de duração arbitrados e tempos de recorrências foi obtida através da aplicação da Equação de I-D-F para Brasília (NOVACAP, 2005), conforme indicada a seguir:

$$i_m = \frac{1574,7 * T_r^{0,207}}{(t+11)^{0,884}} \quad (3)$$

onde:

i_m = intensidade máxima da chuva, em mm/h;

T_r = tempo de recorrência em anos;

t_d = tempo de duração da chuva, em min.

Número de Deflúvio (N)

Para a determinação do número de deflúvio foi considerando tanto o tipo de cobertura superficial do terreno como o grupo hidrológico dos solos, sendo o valor de 'N', determinado conforme o procedimento adotado para o cálculo do valor de CN descrito no método do *Soil Conservation Service* (SCS) in. TUCCI *et al.* (1995).

No método do SCS são considerados quatro grupos hidrológicos de solos, sendo eles:

Grupo A – solos com baixo potencial de deflúvio. Inclui areias em camadas profundas, com muito pouco silte ou argila, inferior a 8%.

Grupo B – solos arenosos com camadas menos profundas que as do tipo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. Este grupo de solo em seu todo, tem uma capacidade de infiltração acima da média.

Grupo C – solos argilosos com teor total de argila de 20% a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras, até a profundidade de 1,2 m. No caso das Terras Roxas, esses dois limites máximos podem ser de 40% e 1,5 m. Os solos do grupo C possuem baixa taxa de infiltração quando completamente úmidos.

Grupo D – solos argilosos, com 30% a 40% de argila total, com camada densificada a uns 50 cm de profundidade e quase impermeável. São solos com elevado potencial de escoamento e baixa taxa de infiltração.

As classes de cobertura superficial do terreno utilizadas foram modificadas e adaptadas do método do SCS em TUCCI *et al.* (1995), de acordo com o descrito a seguir:

Tabela 1. Valores de CN em função da cobertura superficial do terreno e dos grupos hidrológicos de solos. Modificado e adaptado de TUCCI *et al.* (1995).

Tipo de cobertura superficial do terreno	Grupo hidrológico dos solos			
	A	B	C	D
Edificação muito densa, com cerca de 85% de impermeabilização.	89	92	94	95
Edificação não muito densa, com cerca de 65% de impermeabilização	77	85	90	92
Edificações com superfícies livres, com cerca de 38% de impermeabilização.	61	75	83	87
Edificações com muitas superfícies livres, com construções esparsas com cerca de 30% de impermeabilização.	57	72	81	86
Zonas industriais e comerciais, com cerca de 72% de impermeabilização	81	88	91	93
Campo e áreas verdes.	30	58	71	78
Zonas florestais e vegetação densa	36	60	73	79

FATOR DE REDUÇÃO DE PICO (Z)

Segundo WILKEN (1971) o fator de redução de pico é a relação entre o pico de vazão de um hidrograma unitário, devido à chuva de uma dada duração, e o deflúvio da mesma intensidade de chuva, continuando indefinidamente.

Fazendo-se uso de dados de chuvas e de picos de vazão de cheias contribuintes de 20 bacias hidrográficas de pequena escala, do meio oeste dos Estados Unidos, Ven Te Chow na elaboração de seu método, buscou a correlação entre o tempo de duração de uma chuva considerada e a razão entre o fator de ascensão de pico, gerada por esta chuva “ t_d/t_p ”, para determinar o valor de “ Z ”.

$$t_p = 0,005055 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0,64} \quad (4)$$

no qual:

t_p é o tempo de pico da vazão em horas;

L é o comprimento do curso d’água principal, medido em linha reta;

I é a declividade média do curso d’água principal em percentagem;

Os dados do fator “ Z ” utilizados podem ser extraídos da Tabela 2 de fator de redução do tempo de pico de vazão, produzida por WILKEN (1971).

Tabela 2. Fator de Redução do Tempo do Pico de Vazão. Fonte: WILKEN (1971).

Valores de Z em função da relação t_d/t_p									
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	1,60	0,90
0,10	0,08	0,48	0,38	0,86	0,59	1,24	0,76	1,62	0,90
0,12	0,10	0,50	0,39	0,88	0,50	1,26	0,77	1,64	0,91
0,14	0,12	0,52	0,40	0,90	0,60	1,28	0,78	1,66	0,91
0,16	0,14	0,54	0,41	0,92	0,61	1,30	0,79	1,68	0,92
0,18	0,16	0,56	0,42	0,94	0,62	1,32	0,80	1,70	0,92
0,20	0,18	0,58	0,44	0,96	0,63	1,34	0,81	1,72	0,93
0,22	0,19	0,60	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	1,40	0,82	1,78	0,94
0,28	0,24	0,66	0,48	1,04	0,67	1,42	0,83	1,80	0,95
0,30	0,25	0,68	0,49	1,06	0,68	1,44	0,84	1,82	0,95
0,32	0,26	0,70	0,50	1,08	0,69	1,46	0,85	1,84	0,96
0,34	0,28	0,72	0,51	1,10	0,70	1,48	0,86	1,86	0,96
0,36	0,29	0,74	0,52	1,12	0,71	1,50	0,86	1,88	0,97
0,38	0,30	0,76	0,54	1,14	0,72	1,52	0,87	1,90	0,97
0,40	0,32	0,78	0,55	1,16	0,73	1,54	0,88	1,92	0,98
0,42	0,33	0,80	0,56	1,18	0,74	1,56	0,88	1,94	0,98
0,44	0,34	0,82	0,57	1,20	0,74	1,58	0,89	1,96	0,99

Uma vez que a vazão de projeto para determinado tempo de retorno é definida, torna-se possível a simulação do comportamento hidráulico do corpo hídrico. Alguns *Softwares* voltados à hidráulica e hidrologia têm importância elevada nesse sentido, uma vez que simplificam os processos de simulação e diminuem consideravelmente a probabilidade de erros, entre eles está o HEC-RAS.

3.8. HEC-RAS

Desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidráulica (HEC) e de domínio público, o U.S. Army Corps of Engineers, o *Hydrological Engineering Centers River Analysis System* (HEC-RAS) é um software de modelagem hidráulica que permite o cálculo de análise unidimensional de: escoamento permanente e não permanente; transporte de sedimentos em canais; e análise de qualidade da água (USACE, 2010).

O procedimento computacional que possibilita a modelagem dos dados é definido pelo *Standard Step Method* (U.S. A. C. E. 2010), que viabiliza a identificação da altura do espelho d'água entre cada seção transversal e considera a equação universal de conservação de energia. Segundo Belo (2012), a equação aplicada neste processo, pode ser expressa pela Equação 5:

$$Y2 + Z2 + \frac{\alpha2.(V2)^2}{2g} = Y1 + Z1 + \frac{\alpha1.(V1)^2}{2g} + he \quad (5)$$

Onde:

Y1 e Y2: Representa a profundidade das seções transversais

Z1 e Z2: Cotas do fundo do canal

V1 e V2: Velocidades médias

$\alpha1$ e $\alpha2$ Coeficientes de Velocidade

g: Aceleração da Gravidade

he: Perda de energia

O HEC-RAS possui uma interface gráfica para visualização tridimensional da simulação, com capacidade de gerar gráficos e tabelas com resultados das simulações bem como componentes independentes para análise hidráulica. O modelo tem como dados de entrada os hidrogramas calculados por meio do modelo HEC-HMS; seções transversais incluindo margem esquerda e direita, valores dos coeficientes de Manning, de concentração e de expansão (KNEBL *et al.*, 2002; MAIDMENT, 1993).

Obtendo a altura do espelho d'água, torna-se possível determinar as áreas passíveis de inundação e, deste modo, elaborar o mapa com as áreas inundáveis. O mapa será gerado no Software HEC-GeoRAS, que é uma extensão do HEC-RAS dentro do Software de geoprocessamento ArcGIS 10.2.

3.9. HEC-GEORAS

O software HEC-GeoRAS também desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* consiste numa extensão para o SIG ArcGIS, e foi desenvolvido para criar e processar informações geoespaciais para utilização conjunta com o software HEC-RAS, possibilitando gerar os dados requeridos para a modelagem hidráulica em canais de drenagem. Essa extensão realiza uma apresentação visual dessas áreas de inundação, permitindo identificar a sobreposição destas com as áreas de ocupação.

Os resultados gerados pelo HEC-RAS podem ser processados conjuntamente com imagens de sensoriamento remoto, e se dividem em dois: enchentes e inundações. Uma vez que o foco do presente estudo é o risco associado à inundação, cabe a distinção entre os dois fenômenos.

3.10. ENCHENTE E INUNDAÇÃO

Segundo Tucci (2005), o zoneamento de áreas inundáveis deve ser desenvolvido por meio da formulação de um conjunto de restrições à ocupação nas áreas de maior risco, visando evitar perdas humanas e materiais, uma vez que se trata de um problema complexo e grave no planejamento urbano. No entanto, para definir estratégias de auxílio à gestão dessas áreas, é necessário compreender sua dinâmica e, conseqüentemente, os impactos gerados a partir de sua ocorrência.

A distinção entre os conceitos envolvidos neste estudo reside inicialmente, na compreensão dos fatores que envolvem a dimensão entre enchente e inundação. Tem-se, portanto, uma causa comum, o aumento na vazão, mas como consequência, cada evento, possui um determinado resultado que está atrelado a condições específicas que envolvem outros fatores, o que torna o discernimento destes conceitos mais complexos e muitas vezes generalizados.

Segundo Kobayama (2006), a inundação é o processo de aumento do nível do rio além de sua vazão normal por meio do transbordamento para as zonas inundáveis (planícies

de inundação). Ainda segundo Kobayama (2006), quando não ocorre o transbordamento, apenas com o rio cheio, este processo é caracterizado como enchente. Diversos estudos vêm sendo realizados dentro dessa temática, seja delimitando áreas de inundação oriundas de cheias ou de hipotéticos rompimentos de barragens. A Figura 1 apresenta a distinção entre os dois fenômenos de forma visual.

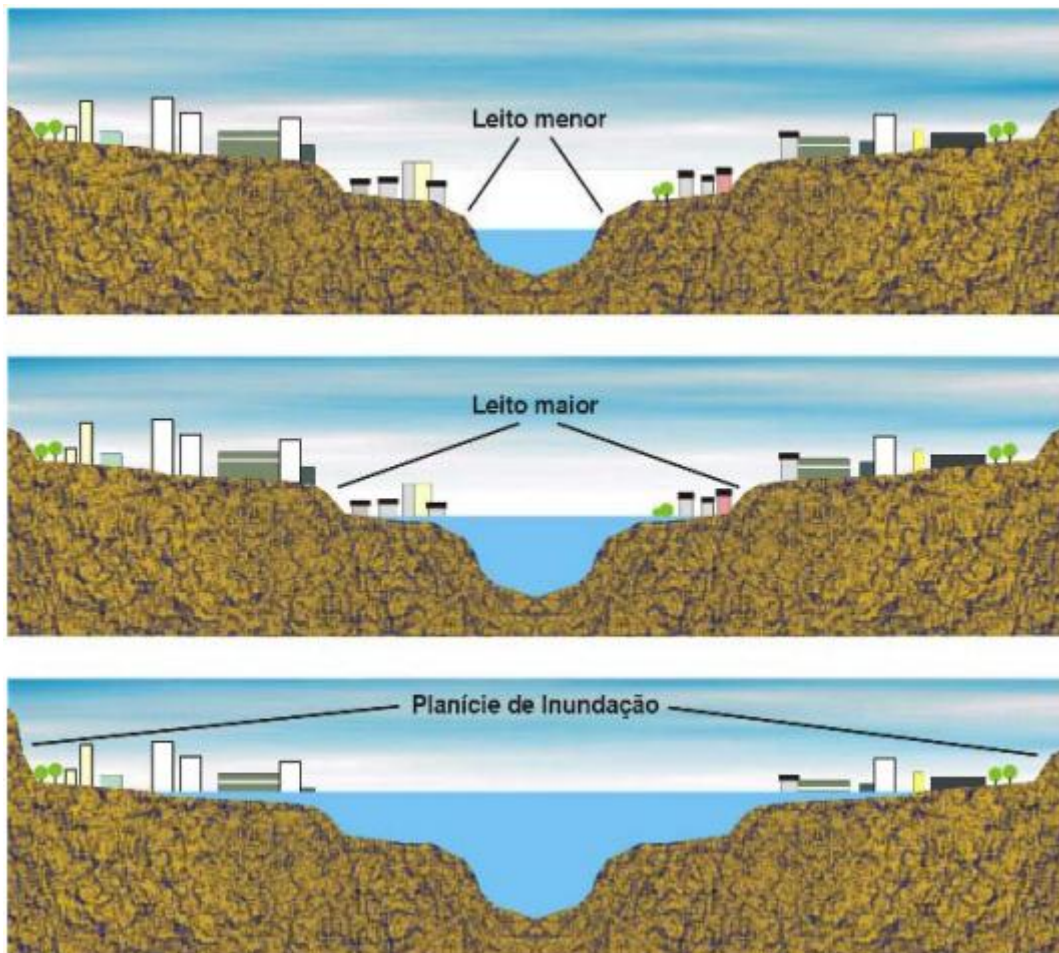


Figura 1. Representação dos leitos do rio e da planície de inundação.
Fonte: Baptista (2007).

O fenômeno da inundação pode ter seus impactos mensurados de forma mais acurada, no que tange a melhor visualização, a partir de Sistemas de Informação Geográficas – SIG, uma vez que esse sobrepõe a mancha de inundação às imagens de alta resolução de sensores remotos da bacia hidrográfica, permitindo identificar se a mancha atingiu escolas, casas e demais locais que ofereçam risco à população.

3.11. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS - SIG

Carvalho (1995) define um SIG como um sistema computacional, usado para o entendimento dos fatos e fenômenos que ocorrem no espaço geográfico. O SIG constitui também uma eficiente forma de armazenamento e atualização dos dados ambientais a serem trabalhados, além de propiciar a análise de situações reais ou hipotéticas, permitindo a substituição direta de qualquer dado registrado. Um SIG pode agregar dados previamente cartografados, dados estatísticos e dados georreferenciados, tornando-se possível avaliar situações ambientais naturais e socioeconômicas do ambiente.

De acordo com DINIZ (2016), para a caracterização dos processos de degradação ambiental, é necessário analisar os elementos do meio físico que participam desse processo, onde a espacialização das informações em extensas áreas requer a utilização de sistemas nos quais seja possível integrar os dados. Os mapas, gerados em SIG, permitem obter uma visão global do que vem ocorrendo dentro da área de estudos, sendo aplicado no planejamento agrícola, na capacidade e adequação do uso do solo, a aplicação de modelos matemáticos para a quantificação de impactos ambientais e a realização de diferentes formas de zoneamento agroambiental.

Além disso, no que tange os estudos de susceptibilidade à erosão, a aplicação de modelos quantitativos foi intensamente facilitada com o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (DINIZ, 2016). Entre os trabalhos científicos de utilização dos SIGs relacionados à pesquisa em pauta, tem-se: produção de carta geotécnica (Almeida *et al.*, 2012), estudos de processos erosivos (Macêdo, 2009), análise do comportamento do sistema urbano mediante comportamento hidráulico (Rafaeli Neto *et al.* 2015), estudo de modelagem espacial com geração de cenários de bacias hidrográficas (Costanza *et al.* 1992) e modelagem de desmatamento para a Amazônia (Soares-Filho *et al.*, 2006), entre outros

3.12. USO E COBERTURA DO SOLO

Devido a sua importância nos estudos de susceptibilidade à erosão e influência em todas as análises do presente estudo, torna-se imprescindível a elaboração de mapas de uso e cobertura do solo de períodos distintos, preferencialmente abrangendo amplo intervalo de tempo. Por meio deste, torna-se possível analisar o crescimento da atividade

antrópica na bacia hidrográfica estudada, responsável por intensa modificação dos atributos naturais e intensificador dos processos erosivos que, por sua vez, acarreta diversos outros danos ambientais, sociais e econômicos, quando ocorre de maneira desordenada.

Além disso, a pesquisa tem como um dos principais resultados a análise da susceptibilidade à perda de solo à inundações, o que requer como parâmetros iniciais os mapas de uso e cobertura do solo e, conseqüentemente, sua correta confecção faz-se primordial para que os resultados atingidos com a simulação sejam de fato condizentes com o processo de ocupação observado na microbacia do córrego da Lagoinha e resulte em uma simulação consistente e compatível com a tendência da região estudada

O presente estudo segue a metodologia de processamento digital de imagens adotado pela maior parte dos autores, que consiste na aplicação de algoritmos de pré-processamento (tratamento) e, posteriormente, outros algoritmos para execução das etapas de realce e classificação supervisionada dessas imagens. Com isso, a extração dos dados é realizada de forma precisa, possibilitando a elaboração de mapas temáticos de uso e cobertura do solo e posteriores análises estatísticas.

No pré-processamento são realizadas a correção geométrica em que se realiza o georreferenciamento das imagens, a fusão, as calibrações radiométricas e a remoção de ruídos. A operação fusão de imagens será utilizada para a integração de diferentes qualidades espectrais e espaciais de sensores remotos diferentes, visando a produção de imagens que combinem tais qualidades (Crosta, 1992; Liu, 2000).

O realce das imagens digitais, por sua vez, possui a finalidade de melhorar a qualidade da imagem sob os critérios subjetivos do olho humano, e assim permitir que o intérprete consiga abstrair uma maior quantidade de informações, tendo em vista, que os sistemas de sensores são programados para registrar toda uma gama de valores possíveis de refletância, originada por todos os tipos de materiais naturais e sob as mais diversas condições de iluminação (Crósta, 1992).

A classificação temática supervisionada, por sua vez, é a etapa na qual são atribuídas classes temáticas aos conjuntos de padrões espectrais presentes na imagem, ou seja, é utilizado de modo a extrair informação das imagens a fim de reconhecer objetos e padrões similares e, dessa maneira, mapear a superfície terrestre de acordo com temas da importância do intérprete.

A classificação temática supervisionada pode ser dividida em duas categorias, na primeira estão as que se baseiam em cada pixel, denominadas comumente de pixel a pixel, no qual utiliza apenas a informação espectral de cada pixel isoladamente para encontrar regiões homogêneas. Já a segunda categoria é a classificação temática por regiões, que utiliza a informação espectral do pixel com a informação espacial dos pixels vizinhos procurando simular o comportamento de um foto-intérprete no reconhecimento de áreas homogêneas na imagem, em que a informação de borda é utilizada, inicialmente, para separar as regiões e as propriedades espaciais e espectrais irão unir as áreas de mesma textura (INPE, 2002).

A fase de pós-classificação temática conta com a edição das classes atribuídas erroneamente pela classificação temática executada, normalmente realizada de forma manual. Com isso, obtém-se um mapa temático final que será utilizado subsídio de entrada para a geração dos mapas de susceptibilidade à erosão.

3.13. MÉTODOS UTILIZADOS PREVISÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

3.13.1. Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS

A quantificação da perda de solo por erosão laminar é importante não só pela identificação das áreas críticas, mas também para o planejamento conservacionista regional. A Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), apresentada por Wichmeier & Smith (1978), é um modelo empírico largamente utilizado para quantificar as perdas de solo por erosão laminar. O modelo foi projetado para gerar um resultado de predição anual da perda de solo; todavia, possui como um de seus aspectos negativos, não se adequar para estimativas de eventos pluviométricos específicos (USDA, 1996).

A Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) é definida como:

$$A = R K L S C P \quad (6)$$

onde,

A= perda de solo, em [ton. (ha. ano)⁻¹]

R= fator erosividade da chuva, em [(MJ.mm). (ha. h. ano)⁻¹]

K= fator erodibilidade do solo, em [(ton. h.). (MJ. mm)⁻¹];

LS= fator topográfico, integração do fator L, comprimento de rampa, e o fator S, declividade [adimensional];

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

P= fator práticas conservacionistas [adimensional].

A aplicação da EUPS com a utilização de SIG resulta em um mapa final que indica espacialmente o potencial de erosão laminar da área de estudo. O mapa resultante é uma combinação de cada um dos mapas produzidos para cada um dos fatores expressos na Equação 6, citados a seguir.

3.13.1.1. Fator de erosividade da chuva (R)

O fator R expressa o potencial da água da chuva em desagregar e transportar o solo por meio do escoamento superficial. Esse potencial da água da chuva é função de sua energia que, por sua vez, depende do tamanho das gotas e também da intensidade da precipitação (Lal & Elliot, 1994).

Para a aferição do fator R, Lombardi Neto e Moldenhauer (1992) sugeriram que o fator EI30 que representa a erosividade da chuva é o que mais se adequa para as regiões com realidade intertropical. Desse modo, esses autores propuseram a Equação 7 para a determinação do valor médio do índice de erosividade da chuva por meio da relação entre a média mensal e a média anual de precipitação.

$$EI_{30}=67,355.\left(\frac{r^2}{P}\right)^{0,85} \quad (7)$$

onde,

EI30 = 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,

Para a determinação do fator R, como citado por Almeida *et al.* (2012), somam-se os valores mensais para os índices de erosividade em cada estação pluviométrica, conforme explicito na Equação 8.

$$R= \sum_{j=1}^{12} EI_{30j} \quad (8)$$

onde, j é um número inteiro que representa o mês do ano.

3.13.1.2. Fator de erodibilidade dos solos (K)

A Erodibilidade é uma propriedade do solo que representa a sua suscetibilidade à erosão, enquanto o fator de erodibilidade (K) é a relação entre perda de solo e a erosividade da chuva.

As avaliações experimentais do valor do fator erodibilidade (K), conforme as normas estabelecidas pela equação universal de perda de solo (EUPS), além de demandarem excessivos gastos e também exigem muito tempo nas suas determinações, uma vez que trabalham com o processo direto da causa e efeito, que é o fenômeno da erosão do solo. Tais motivos tornaram necessária a estimativa do fator K por outros meios, denominados métodos indiretos de determinação da erodibilidade (Mannigel *et al.*, 2002).

A erodibilidade do solo tem despertado interesse pelos pesquisadores, de modo que, constantemente, buscam determinar o fator K que melhor representa o tipo de solo da região estudada. Um método indireto é o proposto por Wischmeir *et al.* (1971); entretanto, o mesmo não se mostrou adequado para aplicação em solos tropicais. Desse modo, Bertoni e Lombardi Neto (1990) estudaram e determinaram o fator K para alguns tipos de solo do Estado de São Paulo.

3.13.1.3. Fator topográfico (LS)

A determinação do fator LS, associação entre o comprimento de rampa (L) e a declividade (S), é de considerável importância, pois exerce uma forte influência na velocidade e no volume do escoamento superficial, intimamente, correlacionados com o processo de erosão laminar.

Nesse sentido, para sua obtenção utilizou-se a metodologia de Moore & Burch (1986), na qual LS pode ser obtido pela Equação 9:

$$LS = \left(\frac{FAxCellSize.}{22.13} \right)^{0.4} \left(\frac{\text{sen (Slope)}}{0,0896} \right)^{1,3} \quad (9)$$

onde,

FA= acúmulo de fluxo ou área de contribuição;

CellSize = tamanho da célula do modelo digital de elevação, corresponde à resolução espacial da imagem de acúmulo de fluxo;

Slope = declividade em radianos, calculada para cada pixel.

3.13.1.4. Fator de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas (P)

O fator de uso e manejo do solo (C) refere-se às perdas de solo em um terreno cultivado sob determinadas condições em relação a um terreno mantido continuamente descoberto. Por outro lado, têm-se o fator de práticas conservacionistas (P) que se refere à relação entre a intensidade esperada da perda de solo com determinada prática conservacionista ou quando a cultura está no sentido de declive, morro abaixo. Nesse sentido, o fator P só é aplicado em áreas cobertas por cultivos, ou seja, esse fator é um ponderador para o fator C em situações especiais de uso e manejo do solo (Macêdo, 2009).

Alguns autores apresentaram propostas para o fator C e P em diferentes tipos de uso e manejo do solo. Em pauta, no País, destacam-se os valores propostos por Bertoni & Lombardi Neto (1990), Stein *et al.* (1987) e Silva *et al.* (2003). Para a área de estudo há também os valores determinados por Almeida *et al.* (2014)

3.13.2. Modelo qualitativo baseado em geoindicadores para avaliação da erosão linear

No caso da erosão linear, será executada uma adaptação à metodologia proposta por Campagnoli (2002), apresentada na Figura 2, que se baseia nos principais mecanismos e condicionantes do relevo, tipos de solo e substrato geológico, que levam às formas de erosão linear apresentadas no item 3.13.2, em que essa metodologia é empregada para o mapeamento das áreas com produção de sedimentos. A adaptação da metodologia se dá na consideração apenas do potencial da região à erosão linear, sem considerar os fatores antrópicos.

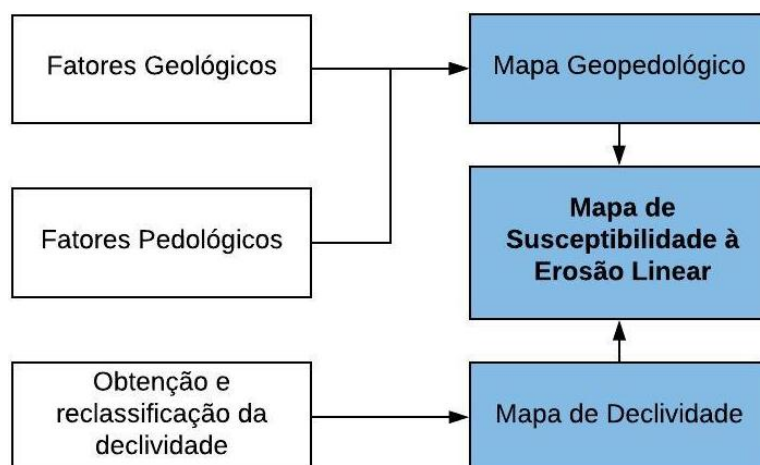


Figura 2. Passos utilizados para a geração do mapa de suscetibilidade à erosão linear.
 Fonte: Adaptado de Campagnoli (2002).

O critério para a classificação dos tipos de solo baseado nas unidades pedológicas considera a espessura e textura das camadas de solo. Nesse sentido, os solos rasos serão classificados com um potencial baixo para erosão linear, pois indica que o substrato rochoso está próximo da superfície e, conseqüentemente, evita o desenvolvimento do processo erosivo linear.

A classificação das unidades geológicas será executada tendo por base a litologia e estruturas das rochas, quanto maior for a permeabilidade e o volume dos espaços vazios no litotipo, maior será o potencial erosivo, pois maior será a chance de desagregação. A Tabela 3 representa algumas rochas mais comuns e seus graus de vulnerabilidade que serão utilizadas como base para a classificação das unidades geológicas da área de estudo.

Tabela 3. Escala de vulnerabilidade à intemperismo e erosão das rochas mais comuns. (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, Anfibolito, Kimberlito, Dunito	1,8	Conglomerados, Subgrauvacas	2,5
Granodiorito, Quartzo Diorito, Granulito	1,2	Hornblenda-TremolitaActinolita xisto	1,9	Grauvaca, Arcósio	2,6
Migmatito, Gnaise	1,3	Estauroлита-xisto, Xisto granatífero	2,0	Siltito, Argilito	2,7
Fonolito, Nefelina-Sienito,	1,4	Filito, Metassiltito	2,2	Folhelho	2,8
Andesito, Diorito, Basalto	1,5	Ardósia, Metargilito	2,2	Calcário, Dolomito, Marga, Evaporito	2,9
Anortosito, Gabro, Peridotito	1,6	Mármore	2,3	Sedimentos inconsolidados (aluvião, colúvio)	3,0

Após a reclassificação dos fatores pedológicos e geológicos, será feito um cruzamento matricial para a obtenção do mapa geopedológico. Posteriormente na etapa 2 executou-se uma reclassificação da declividade e, por fim, mediante um novo cruzamento matricial dos produtos cartográficos das etapas 1 e 2 para a geração de um mapa de suscetibilidade à erosão linear do meio físico, no qual são definidas 5 classes de suscetibilidade, conforme apresentado na Tabela 4, a saber: I - pouco ou nenhum potencial; II- baixo potencial; III- médio potencial; IV- alto potencial e V - muito alto potencial, conforme indica a Tabela 4.

Tabela 4. Critério adotado para os atributos do cruzamento matricial realizado para a obtenção do mapa de suscetibilidade à erosão linear (Adaptado de Campagnoli, 2002).

Mapa geopedológico	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

3.14. ÁREAS DE RISCO À INUNDAÇÃO

Segundo o IPT (1991), “áreas de risco são aquelas áreas que apresentam possibilidades de perigo, perda ou dano, do ponto de vista social e econômico, na qual a população esteja submetida caso ocorra processos físicos naturais”. Dessa maneira, é possível afirmar que as áreas de risco estão sempre associadas à presença da ocupação humana em locais com susceptibilidade à impactos ambientais oriundos de eventos naturais adversos.

De acordo com Cardozo (2009), “as áreas de risco a fenômenos perigosos naturais são aquelas suscetíveis a desastres, os quais podem ocorrer como consequência de ordem natural e/ou causado por atividades antrópicas”. Segundo OLIVEIRA et al. (2006), “o crescimento populacional desordenado é um dos principais agravantes para a ocorrência de desastres, pois sem alternativa de habitação, algumas populações tendem a instalar-se em áreas de baixo valor econômico, como por exemplo, em encostas declivosas sujeitas a escorregamentos ou nas planícies aluviais sujeitas a inundação”.

De acordo com a ABNT ISO GUIA 73 (2009), o risco pode ser definido como sendo o efeito da incerteza nos objetivos.

De acordo com CRISTO (2002), “a transformação ou conversão do solo para uso urbano em locais com restrições naturais a ocupação residencial, pode gerar instabilidade ambiental e colocar em risco a população que ai se instala”. Evidencia-se, desta maneira, que as inundações proporcionam perigo à vida e aos seus bens materiais.

O processo de expansão urbana e a falta de condições de infraestrutura, onde a população acaba ocupando áreas consideradas como áreas de risco, podem ser associados a vários fatores, que vão desde o aumento populacional e a falta de

condições econômicas das pessoas para aquisição de imóveis e terrenos em locais adequados, até a carência de políticas públicas de planejamentos nas cidades e suas periferias (CRISTO, 2002).

Conforme Monteiro (1999), a “existência do risco é em função do ajustamento humano aos eventos naturais extremos que ocorrem em certas áreas”. O autor defende o fato de que as enchentes não trariam riscos se caso as planícies inundadas não fossem ocupadas.

Em grande parte das cidades brasileiras, o crescimento desordenado é classificado como um condicionante de catástrofes naturais, onde essencialmente as classes sociais marginalizadas são obrigadas a apropriarem-se de áreas de encostas e margens de corpos hídricos, tornando-se vulneráveis a eventos naturais diversos.

3.15. ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS (AHP)

De acordo com DINIZ (2016), “a análise hierárquica de processos (AHP) foi desenvolvida pelo matemático Thomas Saaty em 1980, sendo considerado um dos métodos mais utilizados no âmbito de processos de tomadas de decisão. A análise hierárquica de processos (AHP) pode ser definida como um método multicritério e multiobjetivo que possui como alicerce a construção de hierarquias para estabelecer as alternativas de combinações dos dados, de modo que os mesmos possuam consistência lógica.”

Segundo DINIZ (2006), a AHP é uma técnica que necessita inicialmente da escolha pelo decisor de quais variáveis de entrada serão consideradas para a realização da combinação final.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Descoberto apresenta cerca de 20% de sua área ocupada por núcleos urbanos, 3% por corpos d'água e os outros 77% por vegetações variadas e diferentes usos do solo (Golder e Fahma, 2004). Na mesma bacia está o reservatório do Descoberto, com área de 17 km² e capacidade de armazenamento de 120 milhões de m³, utilizado no abastecimento de água do Distrito Federal (DF). Inserida na bacia do rio Descoberto está a área de estudo deste projeto final, a microbacia hidrográfica do Córrego Lagoinha, situada na Região Administrativa de Ceilândia – RA - IX e se desenvolve ao longo da margem direita do rio Melchior, entre este e a cidade satélite de Ceilândia, na bacia hidrográfica do rio Descoberto, o mais importante manancial do Distrito Federal. As Figuras 3, 4 e 5 apresentam a localização da área de estudo.

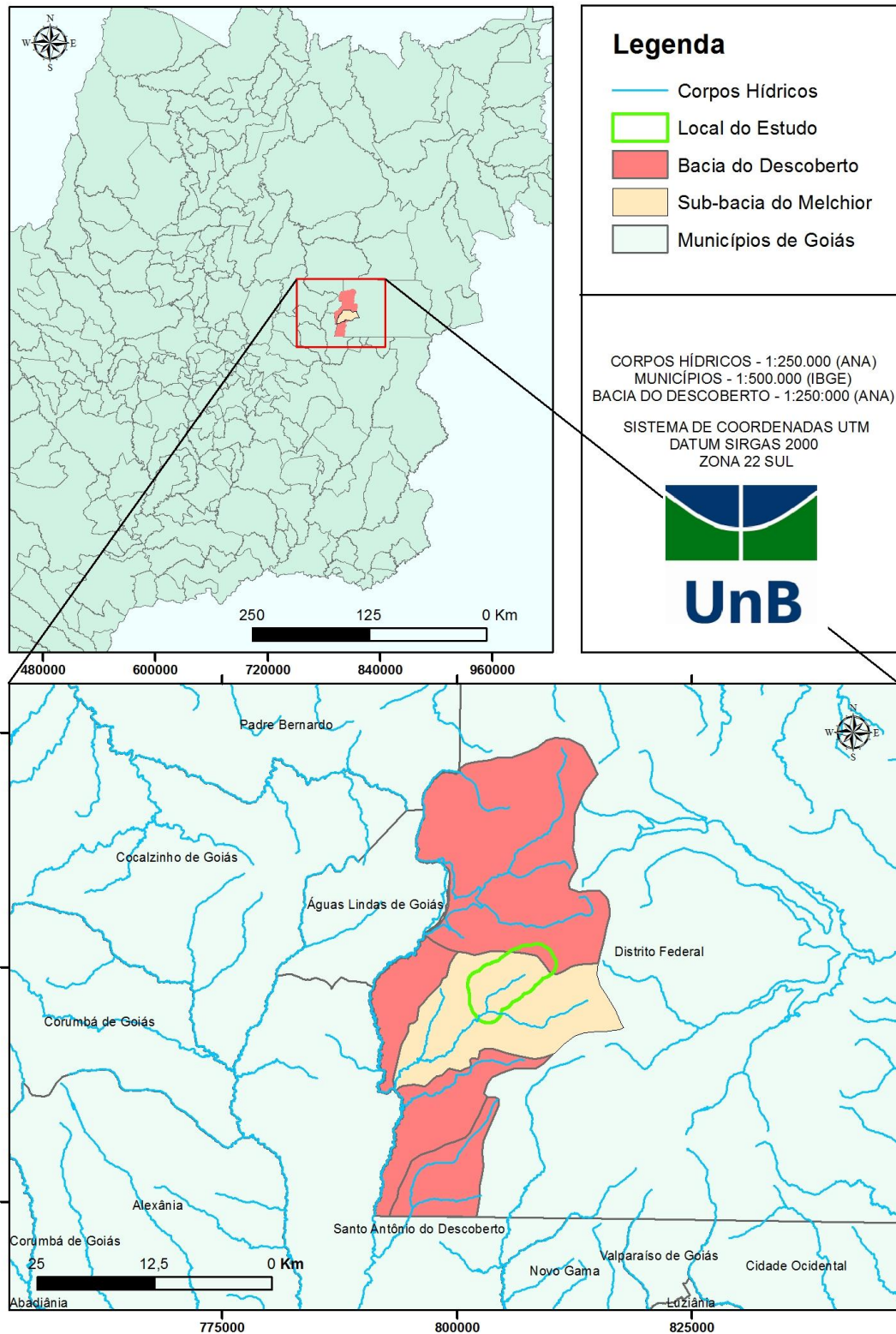


Figura 3. Localização da área de estudo - Microbacia do córrego da Lagoinha.

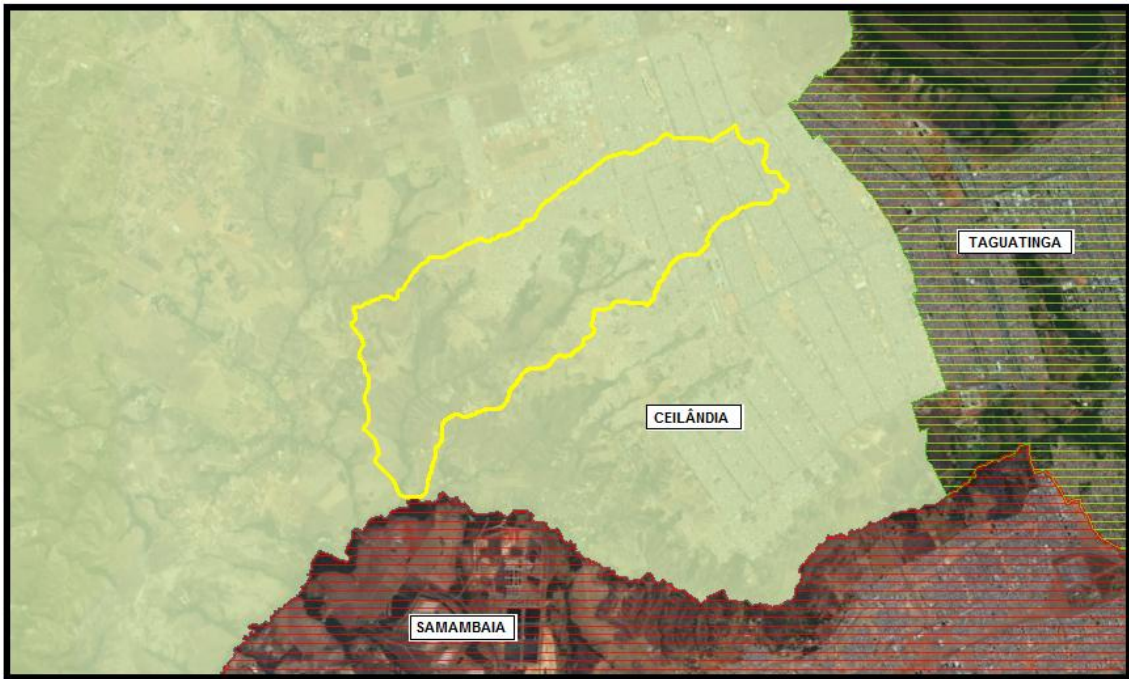


Figura 4. Localização da área de estudo (Microbacia do Ribeirão Lagoinha) em relação às Regiões Administrativas do DF. Fonte: Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habilitação



Figura 5. Localização da área de estudo (Microbacia do córrego Lagoinha). Fonte: Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habilitação

O rio Descoberto a oeste do DF faz fronteira com o Estado de Goiás, e este rio vem sofrendo intensos aportes de esgotos e lixo em suas águas. Inserido na bacia do rio Descoberto está seu afluente, o córrego Lagoinha que possui 15,85km² de área total em sua bacia hidrográfica, e abrange parte dos “condomínios” Pôr do Sol e Sol Nascente, principal enfoque deste estudo, por caracterizarem-se como áreas de alto risco de erosão, desmoronamento e contaminação.

Apontada como a maior ocupação do Distrito Federal e a segunda maior do País pelo censo 2010 do IBGE, o Setor Habitacional Sol Nascente, em Ceilândia, está localizado dentro da área de estudo e receberá foco principal, uma vez que abriga diversas erosões lineares do tipo voçoroca, além de outros prejuízos gerados por processos naturais potencializados por ação antrópica desordenada, como pode ser observado nas Figuras 6 e 7, que são fotografias obtidas em visitas de campo onde é possível se observar riscos associados a processos de escorregamento na comunidade inserida na área de estudo.



Figura 6. Avenida do setor Sol Nascente. Detalhe para a imensa quantidade de sedimentos e lixo. Fonte: G1, 2018.



Figura 7. Voçoroca a 30 metros da Rua 16, Sol Nascente. Fonte: G1, 2018.

4.2.MATERIAIS

O trabalho em pauta utilizará os seguintes materiais:

4.2.1. Imagens

Foram utilizadas imagens do satélite *Digital Globe*, disponíveis gratuitamente por meio do programa Google Earth Pro, mediante processo de georreferenciamento, mosaicagem e equalização. Ao final do processo, adquire-se resolução espacial de 0,25

metros. As imagens utilizadas são do ano de 2017. A Figura 8 apresenta a ilustração do procedimento de recorte do mosaico dentro dos limites da área de estudo.

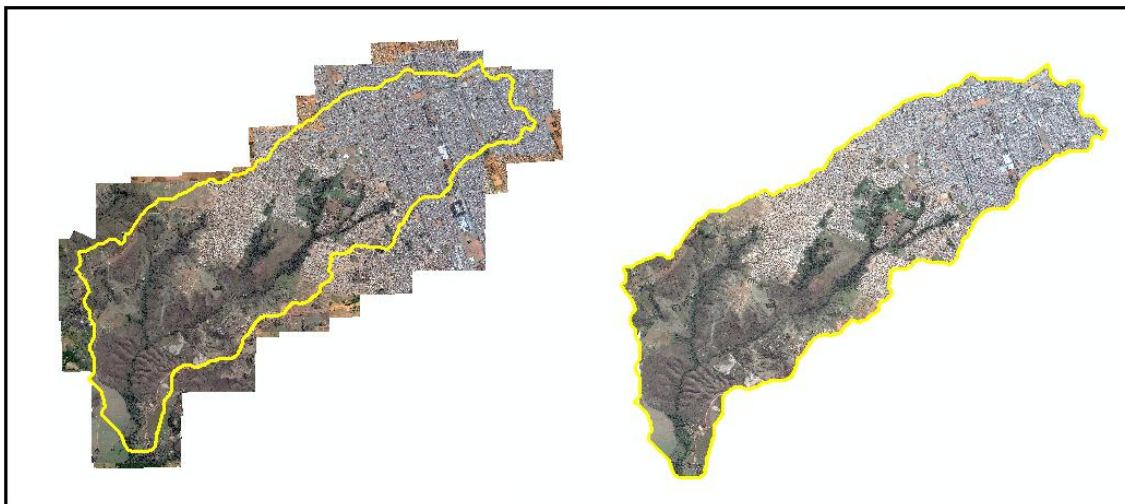


Figura 8. Recorte do mosaico dentro dos limites da área de estudo através do Software ENVI.

No presente estudo, foram georreferenciadas vinte e nove imagens, oriundas do Google Earth Pro. Após a execução do mosaico, o conjunto de imagens se tornou uma única imagem que posteriormente foi recortada dentro dos limites da área de estudo, conforme mostra a Figura 8.

4.2.2. Produtos Cartográficos

Os mapas utilizados para a realização da pesquisa serão os mapas pedológicos (1:500.000) e geológico (1:250.000), obtidos no banco de dados do governo do Estado de Goiás (SIEG) e da empresa Embrapa Solos.

O mapa pedológico representado na Figura 9 possui cinco tipos de solos baseando-se no Sistema Brasileiro de Classificações dos Solos (Embrapa, 2006), a saber:

Cd - Cambiossolo Distrófico: são solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40 cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta.

Rd - Neossolo Distrófico: são solos pouco evoluídos constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando qualquer tipo de horizonte B diagnóstico.

LVd - Latossolo Vermelho Distrófico: são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B latossólico precedido de qualquer tipo de horizonte A dentro de 200 cm da superfície do solo.

LVad - Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico: são solos com textura moderadamente argilosa e constituídos por material mineral.

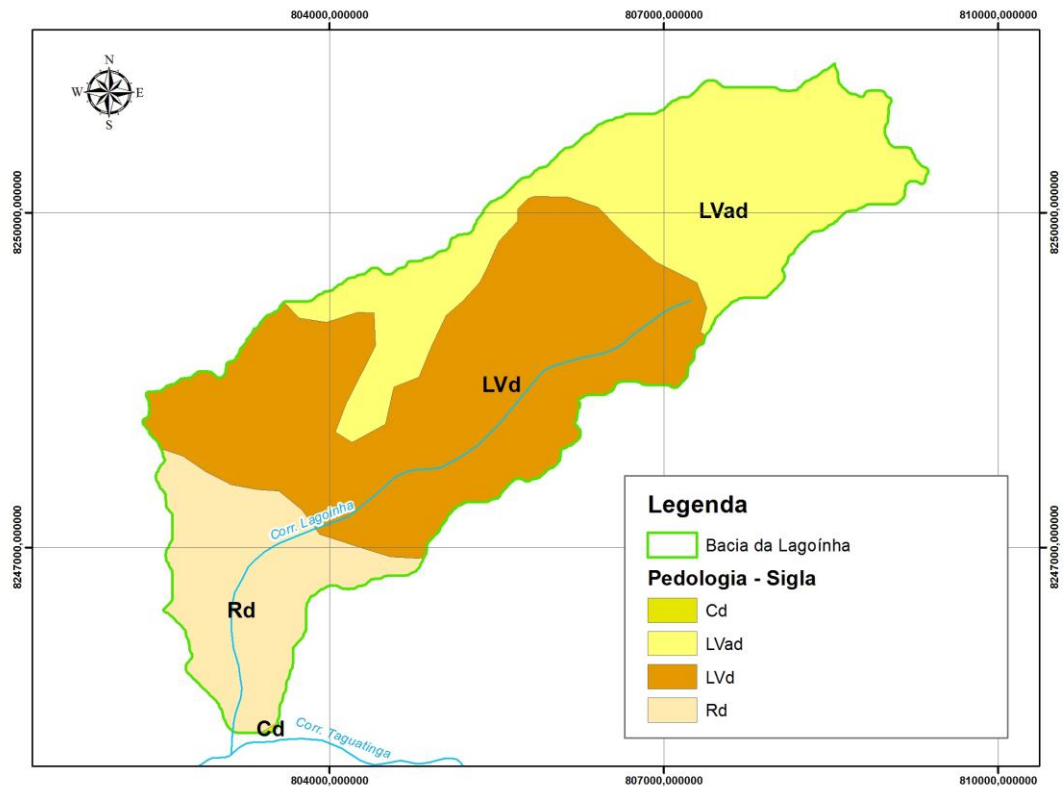


Figura 9. Mapa pedológico utilizado nos mapas de susceptibilidade à erosão.

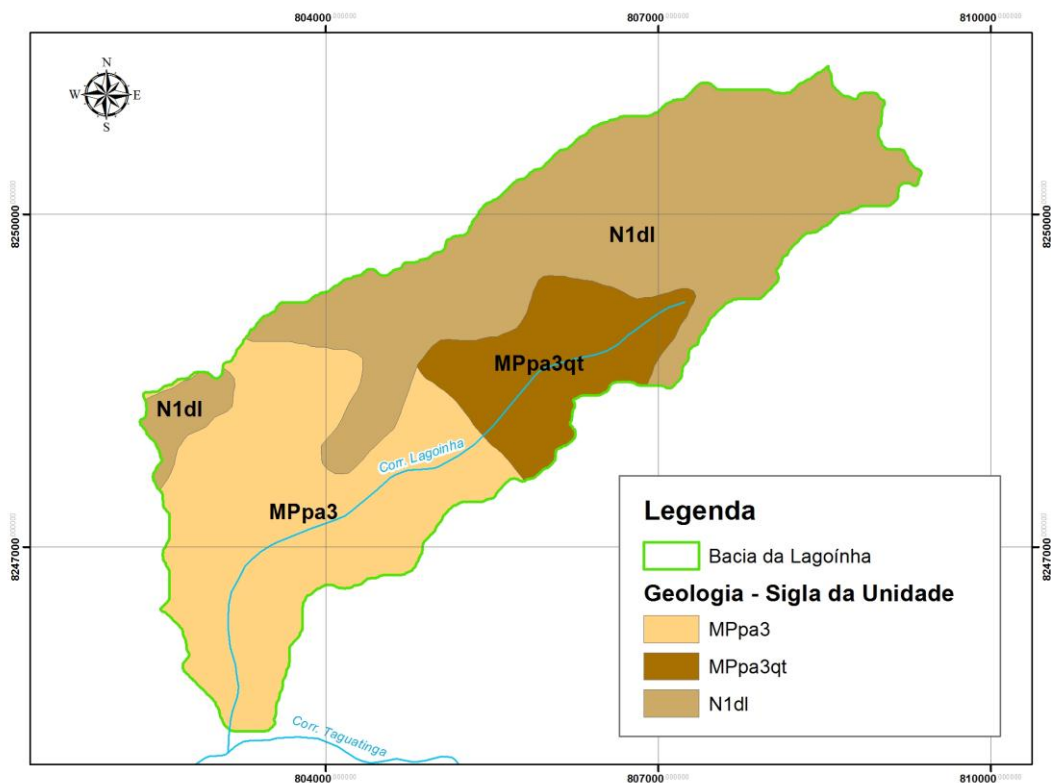


Figura 10. Mapa geológico utilizado nos mapas de susceptibilidade à erosão.

4.2.3. Modelo Digital de Terreno

O MDT é uma técnica de interpolação de curvas de níveis e pontos cotados por meio de uma rede triangular por um termo de coordenadas (x, y, z) de dados de altitude obtidos a partir das folhas disponíveis no banco de dados do site da Secretaria de Estado de Gestão do Território e Habilitação – SEGETH, com equidistância de 5 metros entre as curvas de nível.

As curvas de nível foram transformadas em um TIN - *Triangulated Irregular Network*, ou Rede Triangular Irregular através da ferramenta *Create TIN* do ArcGis 10.5 e, em seguida, em um MDT através da ferramenta *TIN to Raster* do ArcGis 10.5. O resultado pode ser observado na figura Figura 11, onde as cores avermelhadas indicam os locais com menor altitude e as cores mais azuladas os locais com maior altitude.

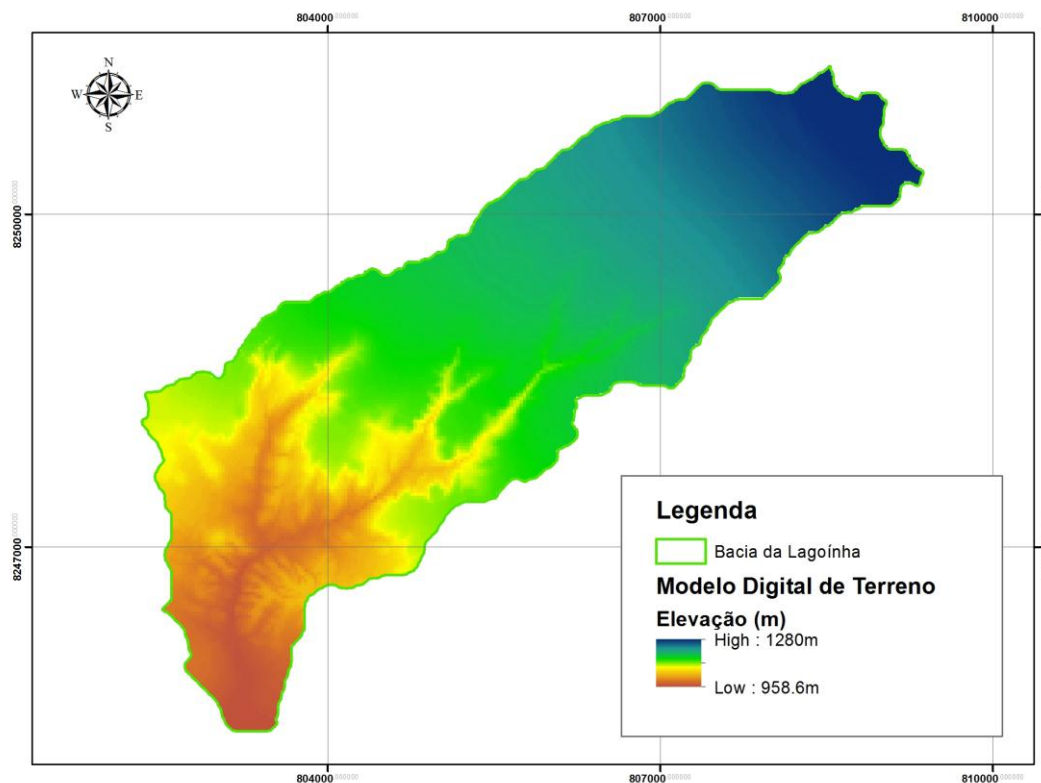


Figura 11. Modelo Digital de Terreno obtido a partir das curvas de nível de 5m.

4.3. METODOLOGIA

A pesquisa fará utilização de algoritmos de geoprocessamento inseridos nos sistemas ArcGIS 10.5.0 *trial*, SPRING 5.4.3 e ENVI para a classificação temática, geração de mapas de vulnerabilidades, aplicação da EUPS, montagem do banco de dados e cruzamento de dados. Além destes, no que se refere a parte hidrológica, o estudo conta com a utilização dos Softwares HEC-HMS e HEC-RAS para realizar as modelagens hidrológicas e gerar os subsídios para a elaboração do mapa de áreas de inundação da bacia. De maneira complementar, será utilizado o programa Excel para organização dos dados pluviométricos da bacia.

A metodologia a ser aplicada no projeto final seguiu as seguintes etapas de execução, apresentadas a seguir.

1ª) Obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo para o ano de 2017 por algoritmos de processamento/classificação temática de imagens nos SIG SPRING e ArcGIS e georreferenciamento da base cartográfica para aplicação dos métodos;

2ª) Produção do mapas por meio de algoritmos de Análise Hierárquica de Processos: mapas de suscetibilidade à processos erosivos laminares (EUPS) e lineares (metodologia de baseada em geoindicadores);

3ª) Aplicação dos modelos HEC-HMS e HEC-RAS e geração do mapa de áreas de inundação;

4ª) União dos resultados e geração do mapa de riscos para a bacia e proposição das medidas mitigadoras.

4.3.1. Mapa de Uso e Cobertura do Solo

O mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 2017 foi gerado nos softwares SPRING/INPE e ArcGIS/Erda utilizando-se as imagens do satélite Digital Globe por meio dos passos metodológicos citados em Almeida *et al.* (2012) e descritos a seguir:

Realce de contraste: em cada uma das imagens resultantes do processo de fusão para os anos de estudo será realizada a ampliação histográfica do contraste da imagem para melhorar a qualidade da imagem sob os critérios subjetivos do olho humano. O realce será feito no algoritmo de expansão do histograma de natureza linear;

Obtenção do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*): O método utilizou a diferença da refletância entre a faixa do infravermelho próximo e a refletância da faixa do visível. Os valores do índice variam de -1 a 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais densa é a vegetação e que o valor zero se refere aos pixels não vegetados. O NDVI é o índice de vegetação mais usado por reduzir o efeito topográfico e é calculado segundo a Equação 10:

$$NDVI = \frac{IV - VM}{IV + VM} \quad (10)$$

Sendo, IV a banda do infravermelho próximo e VM a banda do vermelho;

Segmentação da imagem: as imagens serão submetidas ao processo de segmentação, com a opção de crescimento de regiões, em que os parâmetros de área de pixel e similaridade utilizados serão obtidos a partir do processo interativo em que se buscam os polígonos que mais se adequam para as classes temáticas selecionadas para o estudo;

Classificação temática das imagens: para a execução da classificação temática como produtos de entrada serão utilizadas as três bandas de componentes principais, a

imagem do IVDN e a imagem segmentada. Em seguida, o algoritmo, baseado nas aquisições de amostras para as classes temáticas escolhidas por meio de treinamentos, utiliza-se as técnicas de classificação por regiões com o classificador Bhattacharya (supervisionado), cujos temas de uso e cobertura do solo serão agrupados nas seguintes classes temáticas: cerrado, mata de galeria, corpos d'água, solos expostos, cultura agrícola, áreas ocupação urbana e área de pastagens. O Bhattacharya é um classificador supervisionado por regiões, que utiliza a distância Bhattacharya para medir a separabilidade estatística entre cada par de classes temáticas espectrais. A separabilidade é calculada por meio da distância média entre as distribuições de probabilidades de classes espectrais (Leão *et al.*, 2007). O classificador Bhattacharya requer a seleção de áreas de treinamento, podendo utilizar as regiões obtidas pela segmentação ou polígonos representativos das regiões a serem classificadas;

Pós-classificação: Aplicou-se este procedimento em uma imagem classificada, com o objetivo de uniformizar os temas, ou seja, eliminar pontos isolados, classificados diferentemente de sua vizinhança. Com isto foi gerado imagem classificada com aparência menos ruidosa;

Vetorização/edição das imagens: as imagens temáticas resultantes serão vetorizadas e cada classe temática será associada ao seu respectivo polígono. Em seguida, foi realizada uma edição vetorial, de modo a eliminar dados espúrios gerados no processo de classificação. Ao final do processo, tem-se os mapas de uso e cobertura do solo.

4.3.2. Mapa de Suscetibilidade à Erosão Linear

Para avaliação da suscetibilidade do terreno às erosões lineares foi implementada a metodologia proposta por Campagnoli (2002), conforme apresentado na revisão bibliográfica. Inicialmente é preciso classificar as unidades pedológicas baseando-se na textura dos solos e na espessura das camadas. Desse modo, os solos argilosos e rasos são classificados como I (grau de suscetibilidade pouco ou nenhum), enquanto os solos arenosos e profundos são atribuídos com classificação V (potencial de erosão muito alto). Os solos com características intermediárias receberão atribuições entre II e IV.

O mapa classificado será, então, cruzado com o mapa de unidades geológicas que também será reclassificado e, em seguida, e utilizando-se o resultado dos pesos atribuídos pela AHP, por meio de álgebra de mapas tem-se o mapa geopedológico da

área de estudo que será combinado ao mapa de declividade. Assim, obtém-se o mapa de suscetibilidade à processos erosivos lineares.

4.3.3. Mapa de Susceptibilidade a Erosão Laminar

Foram gerados os mapas temáticos e o modelo digital de terreno da área de estudo para o cálculo das variáveis da EUPS no SIG. Essas variáveis (conjunto de mapas temáticos e índices) possibilitarão o cálculo da EUPS. Serão confeccionados os seguintes mapas finais: mapa do fator topográfico (LS) da área de estudo, constituído pelo cruzamento do mapa de rampa (L) e de declividade (S), onde rampa é diretamente proporcional a velocidade de escoamento superficial, e a declividade, que são propriedades físicas de uma bacia hidrográfica que influenciam a estimativa da quantidade de erosão hídrica devido ao escoamento superficial; mapa do potencial natural à erosão laminar (PNE) decorrente do cruzamento do fator de erosividade das chuvas (R), do mapa de erodibilidade dos dolos (K) e do fator topográfico (LS); e, mapa de perda de solo por erosão laminar (A) decorrente da integração das variáveis físicas com as variáveis antrópicas.

Fator de Erosividade da Chuva (R): o valor de R no presente estudo decorre de levantamento secundário (A.L.F. Trindade *et al*, 2016) – o estudo diz respeito ao cálculo da média de R por bacia hidrográfica. No caso da bacia hidrográfica do rio Paraná, foram utilizadas 344 estações para a composição da média e o valor final obtido foi de 7.924,72 (mm ha-1 h-1.mês). Desta maneira, o fator R é constante para toda a área de estudo.

Fator de erodibilidade dos solos (K): Os valores de K foram obtidos com base no mapa pedológico da área de estudo (Figura 9) e em dados de bibliografia correlatas como a de Bertoni & Lombardi Neto (1990), pode-se observar os valores atribuídos pela Tabela 5. Depois de classificar cada unidade pedológica da região fez-se a reclassificação do mapa no ArcGIS para produzir o mapa de erodibilidade dos solos;

Tabela 5. Valores de erodibilidade (K) para os tipos de solo existentes na área de estudo (Adaptado de Bertoni & Lombardi Neto, 1990).

Sigla	Tipo de Solo	Erodibilidade
Cd	Cambiossolo Distrófico	0.05
Rd	Neossolo Distrófico	0.055
LVd	Latossolo Vermelho Distrófico	0.024
Lvad	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	0.02

Fator topográfico (LS): O fator topográfico foi produzido a partir do mapa de declividade obtido com o MDT por meio da função Slope do ArcGIS, e em seguida, implementou-se a metodologia de Moore & Burch (1986) expressa pela Equação 9, item 3.13.1.3.

Fator de uso e manejo do solo (C) e de práticas conservacionistas (P): Conforme apresentado no item 3.13.1.4, existem vários valores atribuídos para os valores de C e P no País por diferentes autores. Nesse trabalho foi considerado os valores atribuídos por Almeida *et al.* (2012) em sua pesquisa que abrange a área de estudo, e considerando as classes temáticas dos mapas de uso e cobertura do estudo (Tabela 6).

Tabela 6. Pesos atribuídos para os fatores C e P (adaptado de Almeida *et al.* 2012).

Classes Temáticas	Fator C	Fator P
Cerrado	0,01	0,02
Corpos Hídricos	0,00	0,00
Agricultura	0,135	0,10
Mata de Galeria	0,03	0,03
Campo	0,09	0,10
Solo exposto	0,20	0,20
Áreas Urbanizadas	0,00	0,00

4.3.4. Mapa de Susceptibilidade a Erosão Linear

Para avaliação da suscetibilidade do terreno às erosões lineares foi implementada a metodologia proposta por Campagnoli (2002). Inicialmente é preciso classificar as unidades pedológicas baseando-se na textura dos solos e na espessura das camadas. Desse modo, os solos argilosos e rasos são classificados como I (grau de suscetibilidade pouco ou nenhum), enquanto os solos arenosos e profundos são atribuídos com classificação V (potencial de erosão muito alto). Os solos com características intermediárias receberam atribuições entre II e IV. A classificação dos solos da área de estudo encontra-se na Tabela 7.

Tabela 7. Classificação dos solos da área de estudo.

Código	Subordem Pedológica	Textura	Grau de Susceptibilidade
---------------	----------------------------	----------------	---------------------------------

Código	Subordem Pedológica	Textura	Grau de Susceptibilidade
Cd	Cambiossolo Distrófico	Média Cascalheta e Argiloso	II
Rd	Neossolo Distrófico	Média Cascalheta	IV
LVd	Latossolo Vermelho Distrófico	Média Cascalheta	III
LVad	Latossolo Vermelho- Amarelo distrófico	Moderada Argilosa / Argiloso	II

O mapa classificado é, então, cruzado com o mapa de unidades geológicas que também foi reclassificado, com base na literatura (Tabela 7) definiu-se os valores de suscetibilidade à erosão e intemperismo das rochas presentes na microbacia do córrego da Lagoinha, vide Figura 10, resultando na Tabela 8.

Tabela 8. Classificação geológica da área de estudo.

Rótulo	Geologia	Litologia	Tipo	Vulnerabilidade
N1dl	Cobertura Detrito Laterítica	Aglomerado, Laterita, Silte, Areia	Sedimentar	IV
MPpa3	Grupo Paranoá	Metassiltito, Siltito Argiloso	Metamórfica /Sedimentar	III
MPpa3qt	Grupo Paranoá	Quartzito	Metamórfica /Sedimentar	II

Para a classificação de sua vulnerabilidade observou-se, principalmente, as características litológicas das rochas e de sua espessura. Assim sendo, quanto maior a permeabilidade e o volume de espaços vazios no litotipo, maior a facilidade de desagregação e, portanto, maior será seu potencial de erosão.

Depois do cruzamento matricial, de acordo com a Tabela 9, executado pela álgebra de mapas, tem-se o mapa geopedológico da área de estudo que foi combinado ao mapa de declividade. Assim, obtém-se o mapa de suscetibilidade à processos erosivos lineares.

Tabela 9. Atributos para a geração do mapa geopedológico da área de estudo (Adaptado de Campagnoli, 2002).

Vulnerabilidade perda de solo (grupo pedológico)	Suscetibilidade à intemperismo e desnudação (unidades litológicas)		
	II	III	IV
I	I	I	II
II	I	II	III
III	II	III	IV
IV	III	IV	IV

4.3.5. Mapa de Áreas de Inundação

O procedimento de confecção do mapa contendo a mancha de inundação é constituído de oito etapas, conforme descritas a seguir:

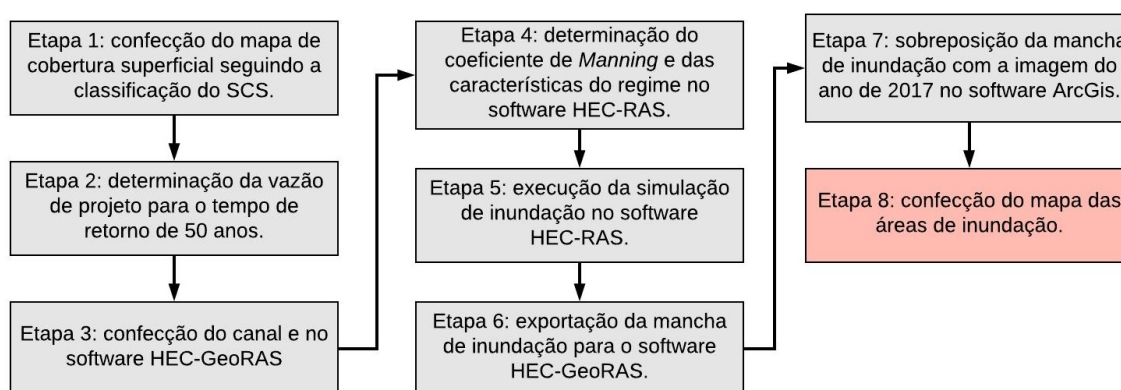


Figura 12. Etapas para elaboração do mapa das áreas de inundação.

4.3.5.1. Etapa 1

O mapa de cobertura superficial foi elaborado a partir do mapa de uso do solo elaborado para a análise de susceptibilidade à erosão, utilizando como classes àquelas descritas pela Tabela 1. Salienta-se que as classes de cobertura superficial do terreno utilizadas foram modificadas e adaptadas do método do SCS in. TUCCI *et al.* (1995). O mapa pode ser observado na Figura 13.

Na microbacia do córrego da Lagoinha, dos quadros grupos de solos discriminados pelo método do SCS foi identificado apenas um tipo de solo: o grupo de solos C, constituído pelos Latossolos e Cambissolos.

O valor de CN foi obtido pela média ponderada dos diversos valores de CNs correspondentes às áreas homogêneas e o valor final encontrado foi de 82,37.

O valor de CN responde pela maior parte das características das bacias hidrográficas produtoras de escoamento, tais como tipo de solo, uso da terra, condição hidrológica e condição antecedente de umidade. (Mishra & Singh, 2004).

Segundo OSTA (1997), o valor de CN é compreendido entre zero e 100, sendo zero a representação de uma bacia de condutividade hidráulica infinita e 100 o valor correspondente a uma bacia totalmente impermeável.

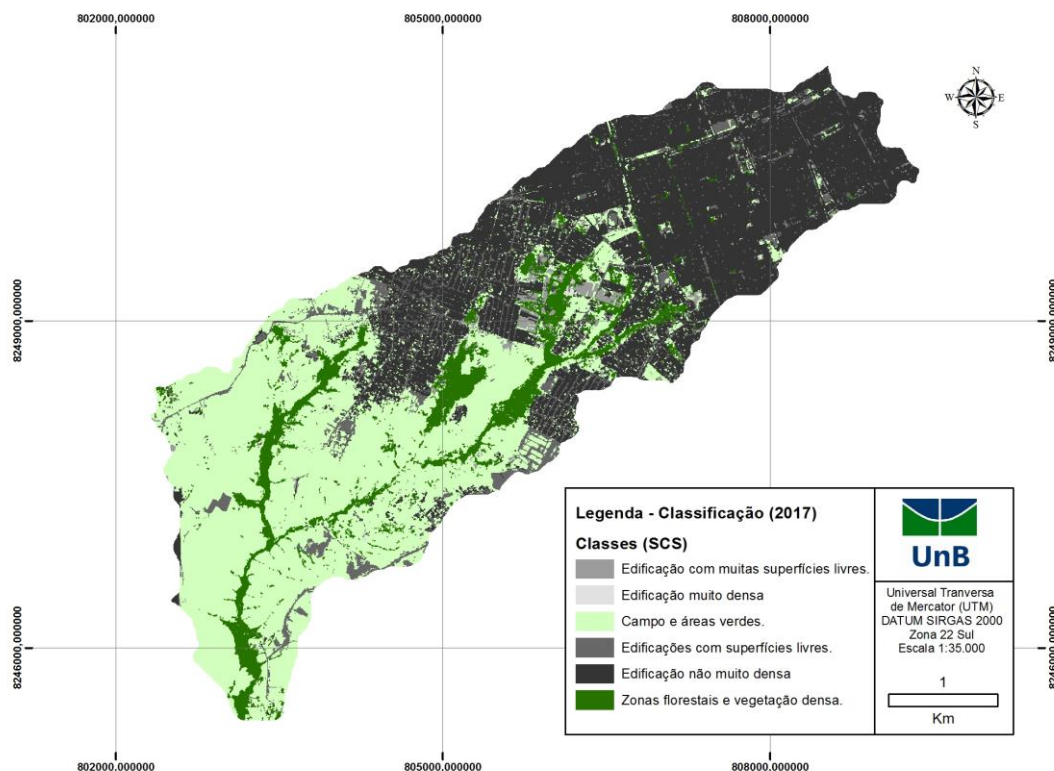


Figura 13. Mapa da cobertura superficial, seguindo a classificação descrita pelo *Soil Conservation Service*, do terreno da microbacia do córrego da Lagoinha.

4.3.5.2. Etapa 2

A determinação da vazão de projeto conta com a utilização do software HEC-HMS para encontrar os valores dos parâmetros do método *Ven Te Chow*. Salienta-se que o tempo de retorno adotado foi de 50 anos, uma vez que se almeja uma simulação de um evento extremo.

A partir da determinação dos valores do número de deflúvio e da intensidade da chuva calculou-se, por meio da Equação 2, a precipitação excedente.

Os tempos de duração foram arbitrados com o objetivo de identificar aquele que propiciaria a maior precipitação.

A Tabela 10 apresenta os valores dos tempos de duração arbitrados (Td), assim como a intensidade resultante, a precipitação obtida por meio da intensidade e, por fim, a precipitação excedente encontrada. Salienta-se que a maior precipitação excedente foi encontrada para um tempo de retorno de 270 minutos, sendo essa a adotada para o presente estudo.

Tabela 10. Valores de precipitação excedente e demais parâmetros encontrados pelo Software HEC-HMS.

Td(min)	Td(h)	Im(mm/h)	R(mm)	Re(mm)
120	2	47.56	95.11	56.80
150	2.5	39.63	99.08	60.32
180	3	34.08	102.23	63.13
210	3.5	29.95	104.84	65.46
240	4	26.77	107.06	67.47
270	4.5	24.22	109.00	69.22

Os dados do fator “Z” utilizados no trabalho foram extraídos da tabela de fator de redução do tempo de pico de vazão, produzida por Wilken (1971). Uma vez que a tabela utiliza a relação entre o tempo de duração e o tempo de pico de vazão (Equação 4), tem-se que: $Td/Tp = 4.5/2.32 = 1.93$. Logo, de acordo com a Tabela 1, para o caso do córrego da Lagoinha, $Z=0.98$.

Finalmente, de acordo com a Equação 1, a vazão de projeto, determinada para o córrego da Lagoinha, é igual a **66.37m³/s**.

4.3.5.3.Etapa 3

A fim de simplificar a confecção do canal e tornar a simulação mais real, uma vez que será adotado regime permanente, foi adotado apenas o trecho final do córrego da Lagoinha para a simulação da inundação. O trecho final possui 1.95km de extensão e se inicia após a última contribuição recebida pelo canal principal do córrego da Lagoinha (Coordenadas (UTM) de referência: 803409.19/8246943.55). Isto posto, foi traçada a linha de fundo do canal, assim como as linhas que determinam os limites das margens, através do software HEC-GeoRAS, acoplado ao software ArcGis 10.5. Com o canal definido, foi delimitada uma situação de contorno de 300 metros em torno do canal,

necessária a aplicação do modelo, assim como as linhas de corte transversais, com espaçamento, neste caso, de 150 metros, conforme ilustrado na Figura 14

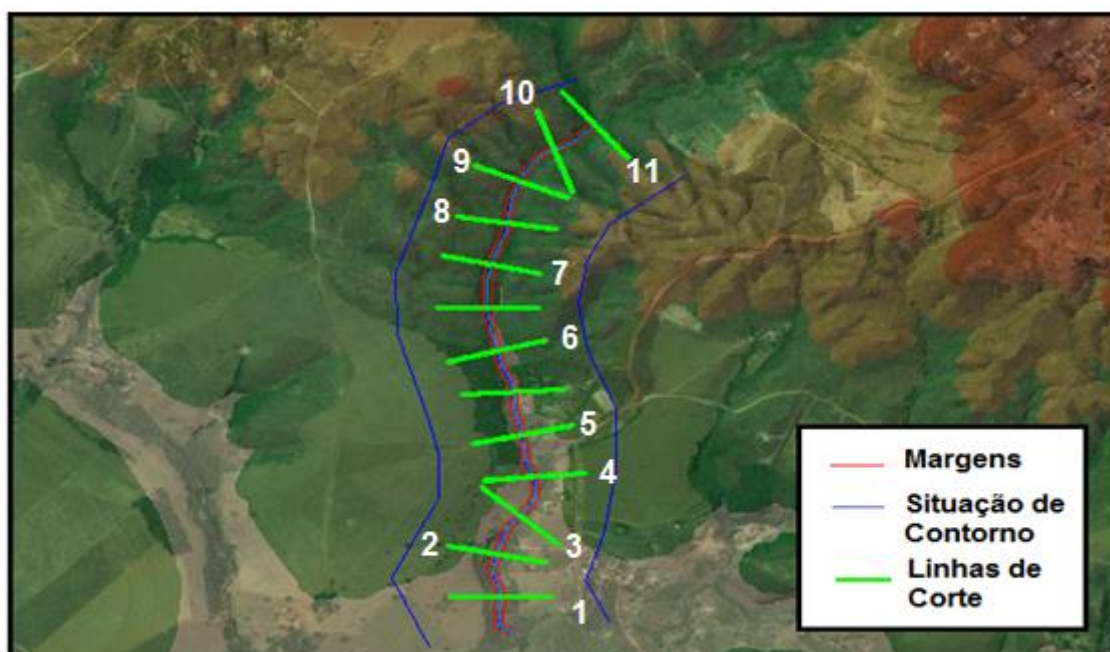


Figura 14. Delimitação do canal e demais parâmetros no software HEC-GeoRAS .

Todos os arquivos foram tridimensionalizados através da introdução do Modelo Digital de Terreno, elaborado a partir das curvas de nível (Figura 11), no HEC-GeoRAS. Desse modo foi possível identificar visualmente os detalhes topográficos das calhas fluviais de interesse.

Por fim, todos os arquivos foram exportados através da ferramenta *Export RAS Data*, a fim de permitir sua importação no software HEC-RAS.

4.3.5.4. Etapa 4

Os arquivos foram importados para o software HEC-RAS e receberam os ajustes finais antes da execução da simulação de inundação.

O valor do coeficiente de rugosidade de Manning (n) foi selecionado por meio de imagens do Google Earth, referentes ao ano de 2017. Para o escoamento na calha do rio, adotou-se $n = 0,40$ como valor inicial e, para escoamento na planície de inundação, em ambas as margens, tomou-se $n = 0,35$.

Visando a simplificação da simulação, foi adotado o regime de escoamento permanente para o trecho final do córrego da Lagoinha.

4.3.5.5.Etapa 5

Foi executada a simulação de inundação no software HEC-RAS e seu resultado foi analisado sob a óptica de cada uma das seções de corte na busca por inconsistências, conforme indica a quinta seção transversal a partir de montante do canal fluvial Figura 15.

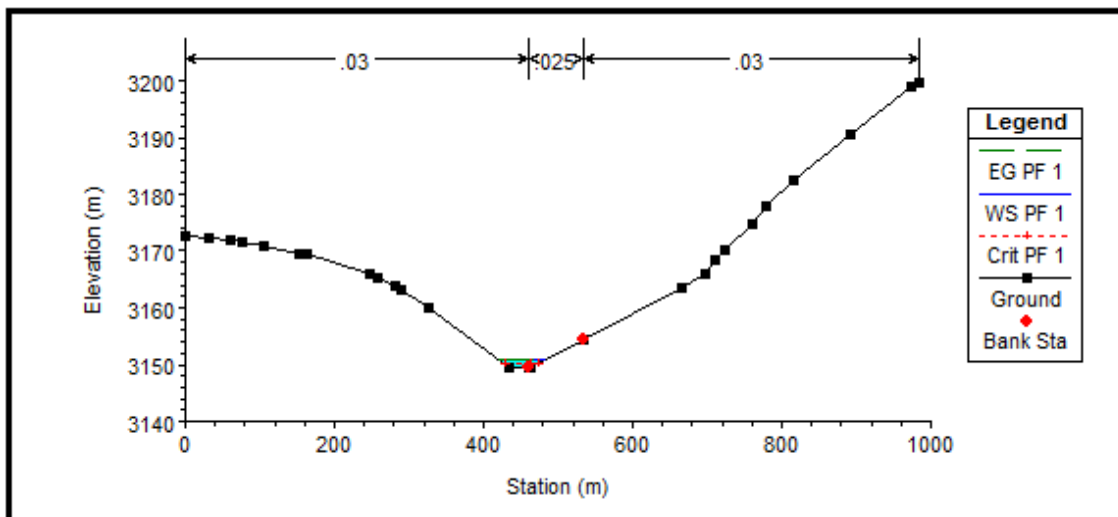


Figura 15. Quinta seção transversal a partir de montante do córrego da Lagoinha após simulação de inundação.

4.3.5.6.Etapa 6

Após executada a simulação de inundação no software HEC-RAS, seu resultado foi exportado para o formato GIS, compatível com o software HEC-GeoRAS, através da ferramenta *Export GIS Data*.

4.3.5.7.Etapa 7

A mancha de inundação gerada no software HEC-RAS foi importada pelo software HEC-GeoRAS - acoplado ao Software ArcGis 10.5-, e sobreposta à imagem de 2017 do satélite *Digital Globe*, visando, principalmente, identificar se a mancha de inundação interfere alguma atividade antrópica na bacia.

4.3.5.8.Etapa 8

Finalmente, o mapa das áreas de inundação foi gerado pelo software ArcGis 10.5.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. MAPA TEMÁTICO DE USO E COBERTURA DO SOLO

A classificação temática obtida pelo processamento das imagens do Satélite *Digital Globe* (2017) possibilitaram a obtenção dos mapas de uso e cobertura do solo (vide Figura 16) e uma avaliação quantitativa na Tabela 11 que apresenta os valores em quilômetros quadrados e em porcentagem para as áreas das classes temáticas consideradas.

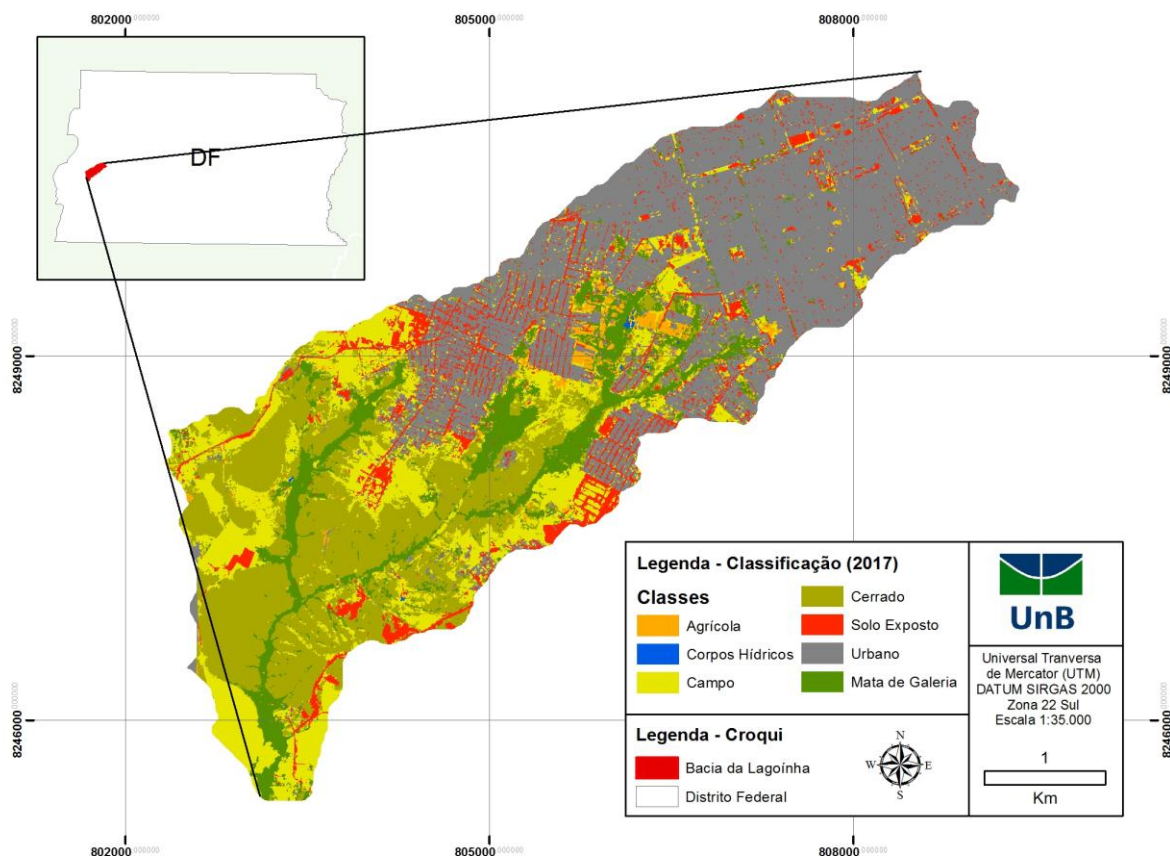


Figura 16. Mapa de Uso do Solo para a microbacia do córrego da Lagoinha no ano de 2017.

Por meio da análise da composição de áreas da microbacia do córrego da Lagoinha, fica evidente que se trata de uma região consideravelmente urbanizada com extensas áreas de solo exposto, indicando que novas áreas vêm sendo desmatadas para dar lugar a complexos habitacionais que, na maioria dos casos, são irregulares. Ressalta-se que a atividade agrícola não é significativa no local.

Tabela 11. Valores de área em km² para cada uma das classes temáticas consideradas e suas respectivas porcentagens em relação ao quadro de áreas.

Classes Temáticas	Área (Km²)	%
Cerrado	3.863	24.37%
Corpos Hídricos	0.008	0.05%
Agricultura	0.313	1.97%
Mata de Galeria	1.502	9.48%
Campo	2.738	17.27%
Solo exposto	1.24	7.82%
Área Urbanizada	6.187	39.03%
Total	15.851	100.00%

5.2 ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROÇÃO LINEAR

O mapa de suscetibilidade à erosão linear seguiu a metodologia exposta no item 3.13.2 na qual a primeira etapa consistiu na obtenção do mapa geopedológico que apresentou como resultado quatro classes de vulnerabilidade e pode ser visualizado na Figura 18.

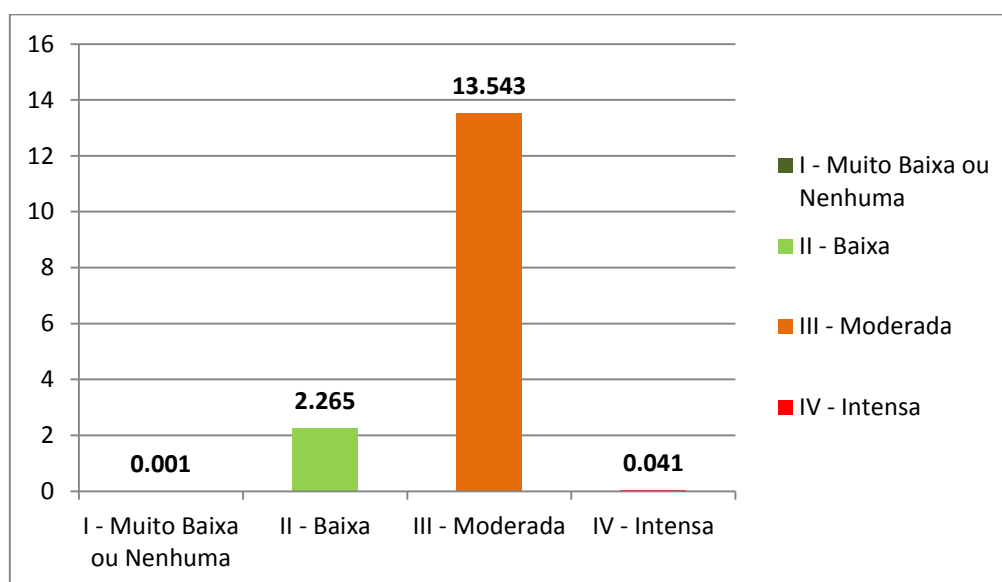


Figura 17. Quadro de áreas referente ao mapa Geopedológico da microbacia do córrego da Lagoinha. Os valores estão em Km².

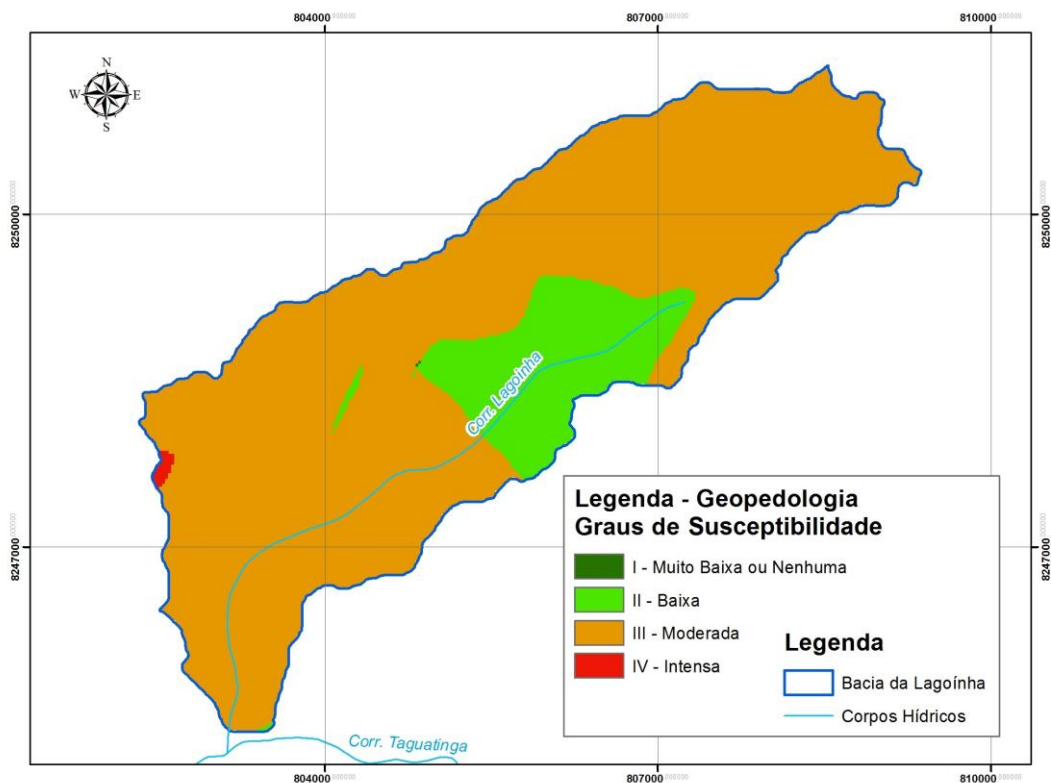


Figura 18. Mapa Geopedológico obtido para a área de estudo.

É possível observar pela Figura 17 que boa parte da região de estudo, correspondente a 13.54Km², é classificada com moderada susceptibilidade à erosão considerando os aspectos geopedológicos; todavia, percebe-se que uma área considerável apresenta baixa susceptibilidade, representando 2.26Km². As áreas classificadas como tendo susceptibilidade intensa e muito baixa não são inexistentes, contudo apresentam-se em porcentagens bem menores frente às demais.

Dando continuidade à elaboração do mapa de susceptibilidade à processos erosivos lineares foi confeccionado o mapa de declividade e executada sua reclassificação, vide metodologia 4.3.4, como resultado obteve-se a Figura 19.

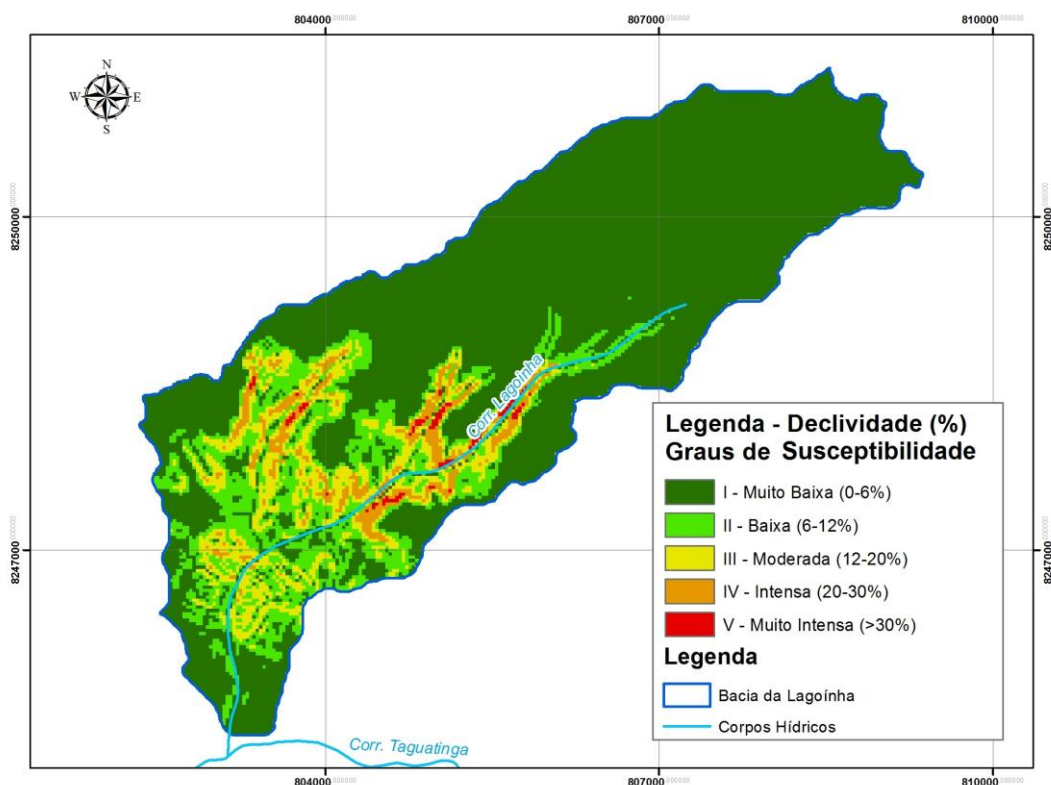


Figura 19. Mapa de declividade reclassificado a partir do MDT/Curvas de Nível.

A Tabela 12 apresenta a declividade e as classes de declividades da área de estudo classificando-a em graus de vulnerabilidade e indicando sua porcentagem frente ao total da área de estudo.

Tabela 12. Declividade da bacia da microbacia de córrego da Lagoinha.

Grau de Suscetibilidade e Declividade (%)	Área	
	Km ²	%
I - Muito Baixa (0-6%)	11.28	71.26%
II - Baixa (6-12%)	2.40	15.16%
III - Moderada (12-20%)	1.47	9.29%
IV - Intensa (20-30%)	0.59	3.73%
V - Muito Intensa (>30%)	0.09	0.57%
Total	15.83	100%

Observa-se que grande parte da área de estudo possui inclinações classificadas como muito baixas, o que a configura como menos propícia à processos erosivos; entretanto, há intensas à moderadas inclinações nas imediações do reservatório que configuram uma preocupação em termos de erosão, pois vertentes com maiores inclinações proporcionam maiores velocidades de escoamento, o que contribui no carreamento e

deposição de sedimentos no reservatório. Salienta-se para a existência de áreas com declividade muito intensa nas proximidades do córrego Lagoinha.

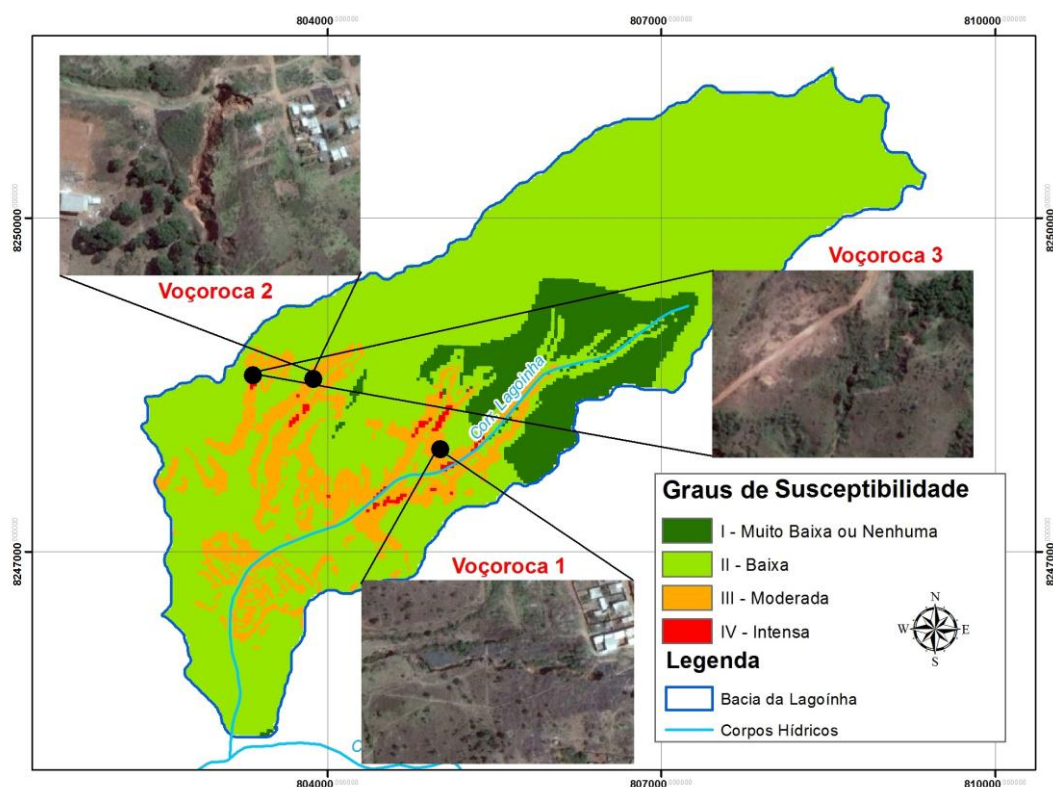


Figura 20. Mapa de suscetibilidade à erosão linear da área de estudo.

Atesta-se que grande parte da área de estudo encontra-se na categoria de muito baixa suscetibilidade à erosão linear; entretanto, as áreas próximas ao córrego da Lagoinha possuem classes de suscetibilidade à erosão linear mais altas devido aos critérios morfológicos de pedologia e geologia e, principalmente, à declividade elevada nestes locais.

Na Figura 20 são indicadas duas voçorocas presentes na área de estudo. Esses fenômenos geológicos resultantes de erosão linear intensa foram identificados através das imagens de alta resolução do satélite *Digital Globe* e, em seguida, sobrepostas ao mapa de suscetibilidade à erosão linear para análise. Através dessa análise, identificou-se que as voçorocas estão localizadas em locais classificados como de moderada suscetibilidade à erosão linear, indicando que os produtos gerados no presente estudo correspondem à realidade encontrada em campo. Não foram encontrados indícios de voçorocas nas áreas classificadas como de baixa ou muito baixa suscetibilidade à erosão. As coordenadas de referência para as imagens das voçorocas indicadas no mapa

são: 804562.27/8248183.51 para a voçoroca 1, 803905.15/8248821.96 para a voçoroca 2 e 803423.52/8248812.42 para a voçoroca 3.

Observa-se na Figura 20 que os contornos das áreas de vulnerabilidade muito intensa no contato com outras áreas de menor vulnerabilidade apontam para condicionantes relacionadas a forma do relevo, de forma análoga ao que foi observado por Diniz (2016), onde se percebe que as formas convexas se mostram mais vulneráveis que as côncavas. Embora requerendo estudos específicos mais detalhados, essa constatação vai ao encontro das observações feitas por Jesus (2013) e Camapum de Carvalho *et al.* (2015), pois em termos de erosão superficial a maior desidratação do solo de superfície nos formatos convexos pode neles gerar maior erodibilidade, no entanto, nos formatos côncavos onde o nível freático se faz presente, torna-se mais elevado e o solo mais úmido, amplia-se o risco de rupturas das encostas que desencadeiam processos erosivos mais concentrados e profundos.

5.3 ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À EROSÃO LAMINAR

Para a confecção do mapa de susceptibilidade aos processos erosivos laminares, torna-se necessário encontrar cada um dos parâmetros da EUPS expressos na Eq. (12). Esses fatores estão apresentados na Figura 21, com exceção do Fator R que é constante para toda a área.

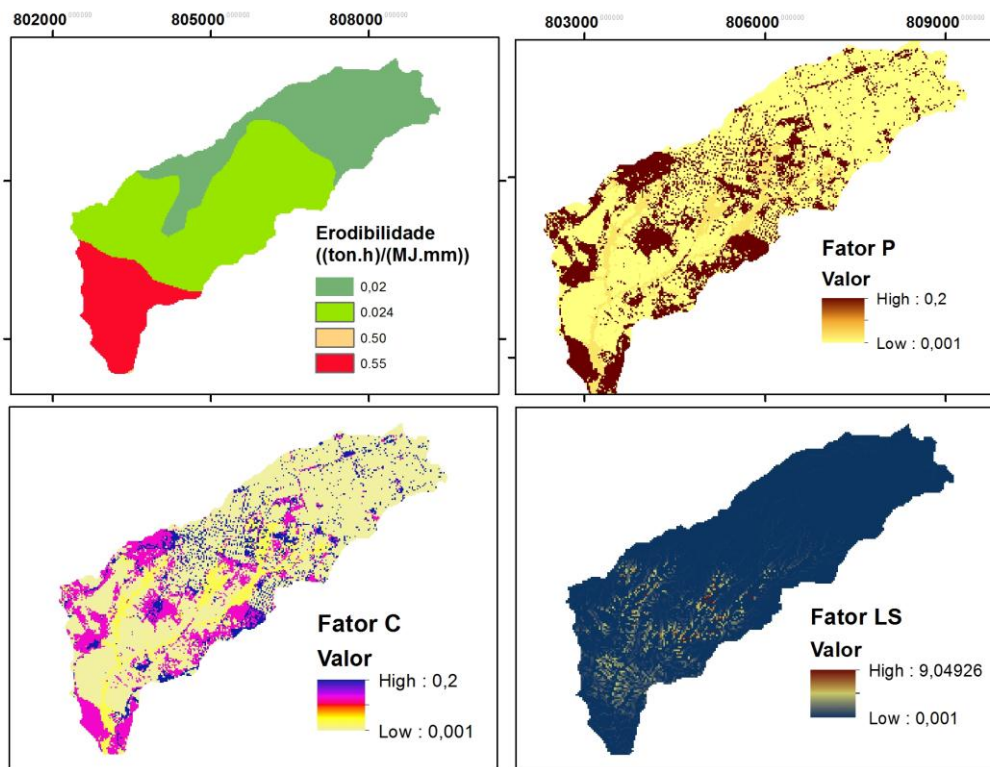


Figura 21. Fatores componentes da EUPS obtidos.

Cada um dos mapas obtidos foi integralizado utilizando o software ArcGis, por meio da ferramenta *Map Algebra* no comando *Raster Calculator* para a obtenção do mapa de perda de solo (Figura 22).

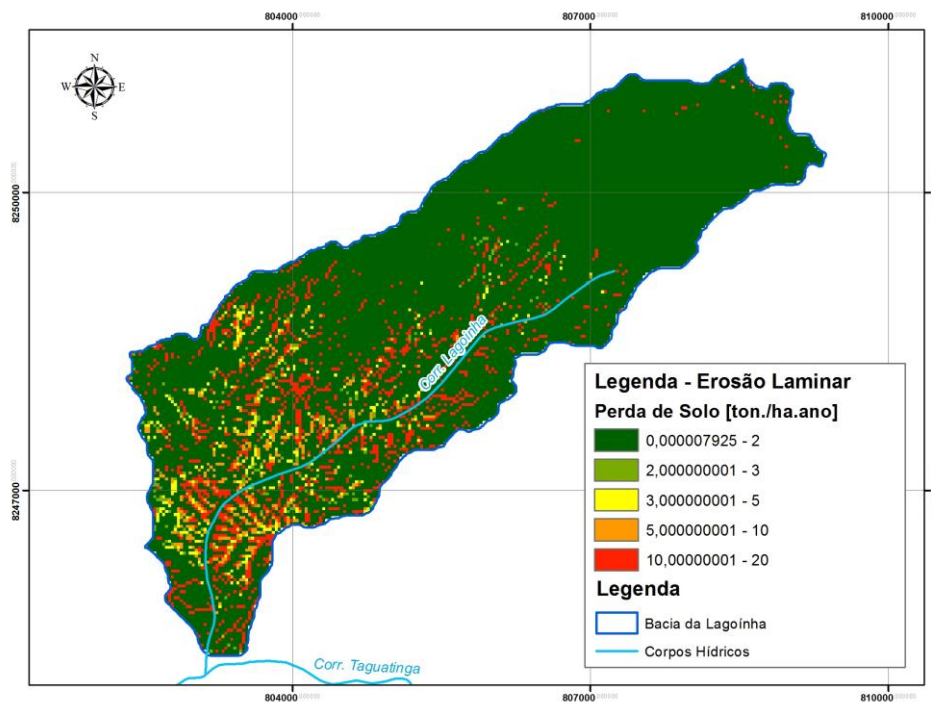


Figura 22. Mapa de susceptibilidade à erosão laminar da área de estudo.

A Figura 22 indica o mapa de susceptibilidade à erosão laminar encontrado para a microbacia do córrego da Lagoinha. Analisando o mapa de perda de solo é possível identificar que a maior parte do território se encontra com muito baixa perda de solo. Porém, nas proximidades das bordas do córrego da Lagoinha há uma perda média de 11.1 ton/ha.ano de solo. Essas regiões referem-se, em geral, à estradas de terra e áreas de loteamentos, como foi observado na primeira etapa desse trabalho, e ainda a locais com elevada declividade.

Diferentemente do que ocorre para o mapa de erosão linear, algumas áreas com processos erosivos evidentes, identificadas através da imagem de alta resolução do satélite *Digital Globe*, ao serem sobrepostas ao mapa de susceptibilidade à erosão laminar, aparecem em áreas classificadas como de baixa susceptibilidade. Esse fato é observado, principalmente, em pontos localizados nas proximidades de áreas urbanizadas, o que pode ser explicado pela atribuição de fator 0 à classe urbanizada durante a elaboração do fator P.

Os valores estimados de perda de solo pela EUPS não devem ser considerados como absolutos, pois alguns fatores da equação precisam de trabalhos de campo. De qualquer forma, o conhecimento acerca do grau de susceptibilidade à erosão laminar em uma bacia pode evitar determinadas práticas construtivas e até mesmo incentivar medidas mitigadoras como a execução de programas de recuperação de áreas degradadas ou revegetação de áreas com solo exposto.

5.4 ÁREAS SUSCEPTÍVEIS ÀS INUNDAÇÕES

Através da elaboração do mapa das áreas susceptíveis às inundações, identifica-se que um total de 5.85 hectares, ou 0.00001% da área da microbacia, seriam atingidos pela mancha de inundação provocada por um evento extremo para um tempo de retorno de 50 anos, conforme indicado pela Figura 23.

Esse resultado pode ser considerado baixo se comparado a estudos do mesmo tipo, como é o caso de Cabral (2016), que estimou uma mancha de inundação de 6.8 km², para a bacia hidrográfica do rio Granjeiro (ES), ou 37.77% da bacia, sendo exorbitantemente superior à encontrada no presente estudo.

Esse fato pode ser explicado pelas características topográficas da bacia do córrego da Lagoinha. O trecho final do córrego – com maior susceptibilidade à inundações- é tipificado por elevadas declividades, o que impede que a mancha de inundação se

alastre por áreas mais extensas. Em síntese, o relevo assume o papel de barramento natural contra as cheias da bacia do córrego da Lagoinha.

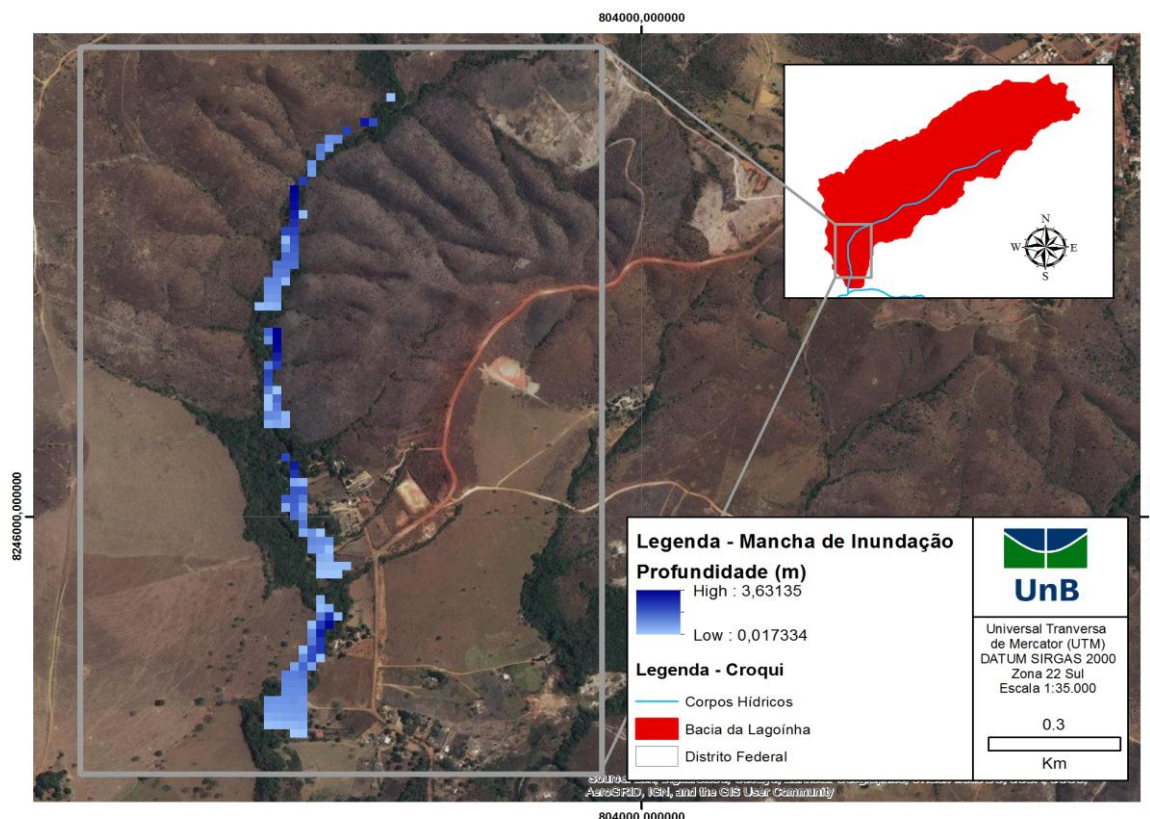


Figura 23. Mancha de inundação encontrada para a microbacia do córrego da Lagoinha.

Todavia, muito embora a mancha de inundação não possua extensão elevada, algumas residências, localizadas nas proximidades das bordas do córrego da Lagoinha, estão susceptíveis a sofrer prejuízos durante os eventos de cheia, ou seja, foram atingidas pela simulação da mancha de inundação obtida com o HecRas, conforme indica a Figura 24. As profundidades atingidas pela mancha de inundação nos locais das casas indicadas por A) e B), na Figura 24, são, respectivamente, 0,68m e 1,12m, o que indica vulnerabilidade.

Uma vez que não existem dados históricos que retratam eventos reais envolvendo inundação no local, não foi realizada etapa de validação do modelo. De qualquer forma, ressalta-se que para atestar a veracidade dos cenários simulados no presente estudo, surge a necessidade de validação com dados de eventos de campo.



Figura 24. Residências atingidas pela simulação da mancha de inundação do córrego da Lagoinha.

6. CONCLUSÕES

As técnicas de mosaicagem utilizadas na obtenção das imagens do satélite *Digital Globe* contribuíram com a obtenção de imagens de alta resolução espacial, o que proporcionou uma classificação temática da imagem resultante com maior precisão para o presente estudo.

O mapa de áreas susceptíveis a processos erosivos lineares se mostrou eficiente na identificação dessas áreas, nas áreas que de fato sofrem processos erosivos intensos, encontradas por meio de imagens de satélite de alta resolução, indicando que a modelagem guarda relação direta com a realidade de campo. Desta maneira, recomenda-se que as autoridades utilizem metodologias análogas durante a etapa de ordenamento territorial prévio à ocupação das bacias hidrográficas do País, de modo a identificar as áreas mais propensas à geração de processos erosivos lineares.

No que se refere à erosão laminar, a metodologia utilizada se mostrou eficiente na identificação dos locais mais susceptíveis a perda de solo em uma escala macro, contudo essa espacialização não guarda uma relação fiel ao que ocorre na realidade pontualmente, ou seja, em alguns casos, áreas que sofrem erosão laminar, identificadas por imagens de satélite de alta resolução, foram classificadas como de baixa susceptibilidade à processos erosivos laminares. Por esse motivo, a metodologia adotada no presente estudo é recomendada para um diagnóstico de uma bacia como um todo, possibilitando que as autoridades adotem diretrizes de mitigação macro na bacia, mas não necessariamente é indicada para análises de perda de solo pontuais.

Salienta-se que, para análises pontuais e conclusões acerca da quantidade precisa de perda de solo anual por hectare, a metodologia com base na EUPS deve ser complementada com levantamentos em campo, visando principalmente o alinhamento entre as escalas da base cartográfica utilizada e os parâmetros primários dos solos locais.

A integração entre a modelagem hidrológica, hidráulica e o SIG mostrou que é possível desenvolver uma metodologia para determinação de áreas de inundação nas bacias urbanas, com base em modelos digitais de terreno e imagens de satélite de alta resolução. Contudo, é importante salientar que essa metodologia carece de uma etapa de validação, sobretudo com dados de campo, para tornar-se confiável.

O modelo hidráulico obtido com o HEC-RAS representou a suposta mancha de inundação na bacia do córrego da Lagoinha para um determinado tempo de retorno, indicando ser uma ferramenta promissora para subsidiar o planejamento territorial de

modo a adotar medidas de mitigação frente a esse tipo de risco e permitindo relacionar o resultado com as características topográficas locais. Contudo, para a adoção da ferramenta no planejamento territorial, sugere-se fortemente a adoção da etapa de validação em campo e da análise de sensibilidade, uma vez que seus resultados podem divergir da dinâmica de cheias que de fato ocorre em campo.

A modelagem hidrológica, que requereu a elaboração do mapa e uso e cobertura do solo, evidencia a sensibilidade da mancha de inundação à ocupação antrópica em bacias hidrográficas.

Chama-se a atenção para a baixa existência de situações de risco com a simulação de inundações, causada pela forma de ocupação da bacia, que ocorreu priorizando as áreas de altitude mais elevada, onde se encontram as áreas planas e próximas ao centro urbano, sendo, conseqüentemente, mais aptas à ocupação irregular.

Trabalhos futuros podem utilizar o presente estudo com o objetivo de analisar o processo de licenciamento de empreendimentos sob a óptica da dinâmica integrada de uma bacia hidrográfica uma vez que aqui foi demonstrado que a construção de complexos habitacionais na parte superior da bacia gera impactos aos moradores localizados na saída desta, fato que não é considerado durante a delimitação das áreas de influencia, que utilizam, na maioria dos casos, raios geométricos para traçar as áreas de influência de empreendimentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT ISO GUIA 73:2009, Gestão de riscos – Vocabulário.

ALMEIDA, C.M. (2003). Modelagem da Dinâmica Espacial como uma Ferramenta Auxiliar ao Planejamento: Simulação de Mudanças de Uso do Solo em Áreas Urbanas para as Cidades de Bauru e Piracicaba (SP), Brasil. 2004, Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - INPE, São José dos Campos.

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

ALMEIDA, W.S., (2014). “Evaluation of unmanned aerial vehicles (UAV) high spatial resolution data to produce digital terrain model and visible spectral imagery”. In: South- Eastern European Journal of Earth Observation and Geomatics, ISSN 2241- 1224. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, Greece. v. 3, p. 239-243.

AZEVEDO, G.F. (2011). Análise da Relação Chuva-Escorregamentos em Regiões Tropicais Montanhosas Urbanas, Caso de Estudo Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal, 120 p.

BAPTISTA, M. (2007). Notas de Aula: Trabalho de Integração Multidisciplinar I - Drenagem Urbana. UFMG.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. (1990). Conservacao do solo. Piracicaba: Livroceres. 3. ed. São Paulo: Ícone, 355 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do Solo. 4. ed. Campinas: Ícone, 1999. 355 p. BUENO, C. R. P.; STEIN, D. P. Potencial natural e antrópico de erosão na região de Brotas, estado de São Paulo. Acta Scientiarum Agronomy, Maringá, v. 26, p. 1-5, 2004.

- CABRAL, S.L.; Campos, J.N.B.; Texeira, A.F.; Silveira, S.C. Hydrologic and hydraulic modelling integrated with GIS: a study of the Acaraú river basin – CE. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v.8, p.167-174, 2014.
- CAMAPUM DE CARVALHO, 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.
- CAMAPUM, J.C; SALES, M.M.; DIOGENES, M.; FAZIO, J.A.; MOTTA, N.O.; FRANCISCO, R. A. (2006) Processos erosivos. In: CAMAPUM, J. C.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO. M.T.S. (Org.). *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC. p. 39-88.
- 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.
- CASTRO, A. L. C. (1998). *Glossário de defesa civil, estudos de riscos e medicina de desastres*. 2.ed. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 283p.
- CHOW, V. (1959).” *Open Channel Hydraulics*”. New York: McGraw-Hill Book Company. 80
- Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 001, de 23 de janeiro de 1986. *Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 jan 1986, seção 1, p. 2548-2549.*
- COSTANZA, R.; FITZ, H.C.; BARTHOLOMEW J.A.; DEBELLEVUE, E. (1992).“The Everglades Landscape Model: Summary Report of Task 1, Model Feasibility Assessment.” Report to the Everglades Systems Research Division, South Florida Water Management District, 3301 Gun Club Road, West Palm Beach, FL 33416. 118 p.
- CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de; HERNANDEZ F°, 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.

- CRISTO, S. S.V de. Análise de susceptibilidade a riscos naturais relacionados às enchentes e deslizamentos do setor leste da bacia hidrográfica do Rio Itacorubi, Florianópolis - SC. 2002. 195 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.
- CRÓSTA, A. P. Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas: IG/UNICAMP, 1992. 170p.
- CRÓSTA, A.P. (1992). Processamento digital de imagens de sensoriamento remoto. Campinas/ SP: IG/UNICAMP. 3ª ed. 170 p.
- DAEE - Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo. (2006). Plano Estadual de Recursos Hídricos- 2004/2007- Resumo. São Paulo, SP. 92p.
- DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica: Balanço Hídrico para o Estado de São Paulo,
- DINIZ, Mariana dos Santos. Estudo da vulnerabilidade e modelagem ambiental para previsão de processos erosivos no entorno de reservatórios: o estudo de caso do Ribeirão Sarandi – UHE Corumbá IV, GO. 2016. 84 f., il. Monografia (Bacharelado em Engenharia Ambiental)—Universidade de Brasília, Brasília, 2016.
- ELLISON, W.D. Soil Erosion Studies. Agric. Eng. St. Joseph. V. 28, 1947.
- EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.(2006). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos. 306 p.
- FANG, J. H. (1997). “Fuzzy logic and geology.” Geotimes - News and Trends in Geoscience, v. 42, p. 23-26.
- FOURNIER, F. (1960) Climat et erosion. Paris, Press Universitaires de France apud NISHYAMA, L. (1995) Erosão do solo: uma visão integrada dos fatores e processos que condicionam o seu desenvolvimento. Seminários Gerais em Geotecnia(833). São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, 95 p.
- G1.COM. Maior favela do DF, Sol Nascente é alvo de gangues e grileiros. Disponível em: <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2015/03/maior-favela-do-df-sol-nascente-e-alvo-de-gangues-e-grileiros.html>. Acesso em: 15 jun. 2018.
- GOLDER/FAHMA. Plano de Gerenciamento integrado dos Recursos Hídricos do Distrito Federal – PGIRH, integrante do Programa de Saneamento Básico.

- HEC (2008). “HEC-RAS River Analysis System”. Hidraulic Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers. USA.
- INPE, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. (2002). Tutorial SPRING 3.6, São José dos Campos , SP. 81
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SAO PAULO. (1990). Orientações para o combate à erosão no estado de São Paulo, Bacia do Pardo Grande. São Paulo, 3v. (IPT). Relatório, 28:184.
- IPT, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1986). Paranapanema. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Vol.6. (IPT, relatório, 24.739), (C.P; ME), São Paulo, SP.
- JESUS, A. S. (2013). Investigação Multidisciplinar de Processos Erosivos Lineares: Estudo de Caso da Cidade de Anápolis – GO. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 367p.
- LAL, R; ELLIOT, W. (1994). “Erodibility and erosivity”. In: Soil Erosion Research Methods,
- KNEBL M.R. YANG Z.L.; Hutchison, K.; Maidment, D.R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. Journal of Environmental Management, v.75, p.325–336, 2005.
- KOBIYAMA et al. Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos. Curitiba:Organic Trading, 2006.
- LAL, R. (Ed), Ankeny: Soil and Water Conservation Society, pp180 – 208.
- LEPSCH, I.F. Formação e Conservação dos Solos. 2 ed. Oficina de Texto, São Paulo, 2010.
- LIU, J. G. (2000). “Smoothing Filter-based Intensity Modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details”. Int: J. Remote Sensing, Vol. 21, No, 18, pp. 3461-3472.
- LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. (1999). Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo. Campinas: Instituto Agrônômico, 12p. (Boletim Técnico, 28).

- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. (1992). Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. *Bragantia*, Campinas, 51(2): pp. 189-196.
- MACÊDO, I. L. (2009). Estudo de modelos em ambiente de geoprocessamento para a previsão de erosão e assoreamento de reservatórios: o caso da Bacia do Rio Indaiá- UHE Três Marias, MG. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 312p.
- MACÊDO, Íris Luna. 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. 2009. Tese (Doutorado em Goetécnica)-Universidade de Brasília, Brasília, 2011.
- MANNIGEL, A. R. ; CARVALHO, M. P. ; MORETTI, D. ; MEDEIROS, L. R. (2002). Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo. *Acta Scientiarum (UEM)*, Maringá, v. 24, n.5, p. 1335-1340.
- MIRANDA, Robinson Nicácio de. *Direito ambiental/ Robinson Nicácio de Miranda*. – 2. Ed. – São Paulo: Rideel, 2010.
- MMA, Ministério do Meio Ambiente. Catálogo de imagens de satélite RapidEye do MMA. Disponível em: < <http://geocatalogo.mma.gov.br/>>. Acesso em: abril de 2016.
- MONTEIRO, C. A. de F. Geossistemas como Elemento de Integração na Síntese Geográfica e Fator de Promoção Interdisciplinar na Compreensão do Ambiente. *Florianópolis: Revista de Ciências Humanas*, vol.14, n.19, 1996. p. 67 - 101.
- MOORE, I.; BURCH, G. (1886). Physical basis of the length-slope factor in the universal soil loss equation. In: *Soil Science Society of America Journal*. p- 1294-1298.
- OLIVEIRA, A.C.B., SOARES, G.M.M., MARTINELLI, L.A. & ZACARIAS, M.M. 2006. Carbon sources of fish in an Amazonian floodplain lake. *Aquat. Sci.* 68:229-238.
- OLIVEIRA, G.G.; Saldanha, D.L.; Guasselli, L. A. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Caí/RS. *Geociências*, v.29, p.413-427, 2010

- RAFAELI NETO, S. L.; CORDEIRO, M. T. A. (2015) Análise do comportamento de sistemas urbanos por meio de componentes de sistemas hidrológicos. GEOUSP: Espaço e Tempo (Online), [S.l.], v. 19, n. 1, p. 142-155,. ISSN 2179-0892.
- ROBAINA, L.E.S.; Kormann, T.C.; Schirmer, G.J. Zoneamento das inundações na área urbana de Alegrete-Rio Grande do Sul-Brasil. Geociências, v. 32, n.2, p. 346-355, 2013.
- SAATY, T. L. (1980). "The Analytic Hierarchy Process". McGraw-Hill, New York. 287p.
- SALOMÃO, F. X. de T. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. Erosão e Conservação dos Solos: Conceitos, Temas e Aplicações. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999.
- SIDLER, R.C. E OCHIAI H. (2006). Landslides - processes, prediction, and land use, 1st ed., American Geophysical Union, Washington, USA, 312 p.
- SIEG, Sistema Estadual de Geoinformação de Goiás. Download de arquivos de SIG. Disponível: < <http://www.sieg.go.gov.br/>>. Acesso em: janeiro de 2016.
- SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. (2003). Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas. São Carlos: Editora Rima,, 138 p.
- SOARES-FILHO, B. S.; NEPSTAD, D; CURRAN, L.;Voll, E.; CERQUEIRA, G.; GARCIA, R. A.; RAMOS, C. A.; MCDONALD, A; LEFEBVRE, P., SCHLESINGER, P. (2006). "Modeling conservation in the Amazon basin. Nature", v. 440, p. 520-523.
- STEIN, D. P.; DONZELLI, P. L.; GIMENEZ, A . F. PONÇANO, W. L. LOMBARDI NETO, F. (1987). Potencial de erosão laminar, natural e antrópico na Bacia do PeixeParanapanema. Anais do IV Simpósio Nacional de Controle de Erosão. Marília, SP, P. 105-135. 84
- TUCCI, C. E. M. (2004). Controle de Enchentes. In: TUCCI, C.E.M. (org). Hidrologia: Ciência e Aplicação. Porto Alegre, RS, Ed. UFRGS/ABRH, 3.ed., 1ªreimp. p. 391-441.
- US ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE, (2000) Hydrologic Engineering Center. HEC - HMS Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual . Davis: HEC, 138 p.GUERRA, A.J.T., e CUNHA, S.B. Degradação ambiental. In: Geomorfologia e Meio Ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil,p 455., 1995.

- USDA. (1996). "WEPP Project". Internet, Purdue University. 3p.
- USDA. *A method for estimating volume and rate runoff in small watersheds*. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture. Soil Conservation Service, 1973.
- USDA. *Ponds - planning design and construction*. Washington, DC: U. S. Department of Agriculture. Natural Resource Conservation Service (NRCS), 1997.
- USGS, United States Geological Survey. Obtenção imagens de satélites e de radares. Disponível em: < <http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: abril de 2016.
- VALENTE, J. A. (Org). *O Professor no Ambiente Logo: Formação e Atuação*. Campinas, SP: NIED, Unicamp 1996.
- WISCHMEIER, W.H. et al. (1971). "A soil erodibility nomogram for farmland and construction sites". *J. Soil Water Conserv.*, Itimore, v.26, n.5, p.189-193.
- 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.