

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

ANÁLISE QUANTITATIVA DE EROSÃO LAMINAR EM
ÁREA DEGRADADA POR MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO
NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DO PÔR DO SOL/DF

VICTÓRIA GOMES DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO
COORIENTADORA: POTIRA MEIRELLES HERMUCHE

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO/2020

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

**ANÁLISE QUANTITATIVA DE EROÇÃO LAMINAR EM
ÁREA DEGRADADA POR MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO
NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DO PÔR DO SOL/DF**

VICTÓRIA GOMES DE OLIVEIRA

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

APROVADA POR:

**MANOEL PORFÍRIO CORDÃO NETO, D.Sc. (ENC - UNIVERSIDADE DE
BRASÍLIA)
(ORIENTADOR)**

**ELEUDO ESTEVES DE ARAÚJO SILVA JÚNIOR, D.Sc. (ENC - UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**DANIELLA DIAS VIVALDI, M. Sc.
(EXAMINADORA EXTERNA)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 10 DE DEZEMBRO DE 2020.

FICHA CATALOGRÁFICA

DE OLIVEIRA, VICTÓRIA GOMES
ANÁLISE QUANTITATIVA DE EROSÃO LAMINAR EM
ÁREA DEGRADADA POR MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA
REGIÃO ADMINISTRATIVA DO PÔR DO SOL/DF.

ix, 70 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental,
2020)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade
de Tecnologia

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. EROSÃO LAMINAR 2. MINERAÇÃO
3. EUPS 4. PERDA DE SOLO
I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

De Oliveira, V. G. (2020). *ANÁLISE QUANTITATIVA DE EROSÃO LAMINAR EM ÁREA DEGRADADA POR MINERAÇÃO: ESTUDO DE CASO NA REGIÃO ADMINISTRATIVA DO PÔR DO SOL/DF*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 70p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DA AUTORA: Victória Gomes de Oliveira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise Quantitativa de Erosão Laminar em Área Degradada por Mineração: Estudo de Caso na Região Administrativa do Pôr do Sol/DF

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2020

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. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.

Victória Gomes de Oliveira
victoriag.oliveira97@gmail.com

“Tudo o que somos é poeira ao vento”

(Kerry Livgren)

RESUMO

As atividades antrópicas são os grandes agentes aceleradores dos processos erosivos, desencadeando o transporte e deposição das partículas do solo através da ação das gotas de chuva e escoamento superficial. Dentre estas atividades, destaca-se a mineração, como principal fonte de recursos minerais fundamentais para o desenvolvimento socioeconômico e causadora de alterações na qualidade do solo. A ausência de medidas de proteção ambiental contribui para o risco de degradação em toda área de influência da mineração. No Distrito Federal, a atividade minerária possui o enfoque em cavas à céu aberto de extração de minerais não metálicos. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi estimar a perda de solos por erosão laminar na bacia hidrográfica que abrange uma área degradada por mineração, onde não foi feito processo de recuperação. Foi utilizado como referencial o ano 1995 antes da atividade e 2017 após a atividade. Para determinar a perda superficial de solo na área de mineração foi utilizada a Equação Universal de Perda de Solo (EUPS), consideram-se fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, comprimento de rampa, declividade, uso e manejo do solo e práticas conservacionistas associada a um Sistema de Informação Geográfica (SIG). A análise prévia do potencial de erosão pode orientar o estabelecimento de programas de recuperação e monitoramento ambiental da área minerada. A modificação dos parâmetros ambientais na bacia em estudo para os anos 1995 e 2017 serviu de comparação da perda do solo na área de mineração, sendo necessária a implantação de medidas remediadoras para desenvolver o processo de estabilização da área e de recuperação do ecossistema local.

Palavras-chave: Mineração. EUPS. Erosão laminar. Perda de solo.

ABSTRACT

Anthropic activities are the major accelerating agents of erosive processes, resulting in the transport and deposition of soil particles through the action of raindrops and runoff. Among these activities, mining stands out as the main source of fundamental mineral resources for socioeconomic development and causes soil quality changes. The absence of environmental protection measures contributes to degradation risk in the entire area of influence of mining. In the Federal District, mining activity focuses on open pit mines for extraction of non-metallic minerals. In this sense, the objective of this work was to estimate the soils loss by laminar erosion in the hydrographic basin where there is a degraded mined area and where no recovery process has been carried out. The 1995 year before the activity started and 2017 year after the activity was deployed were used as a reference. To determine the superficial soil loss in the mined area, the Universal Soil Loss Equation (USLE) was used, factors of rain erosivity, soil erodibility, slope length, slope, soil use and management and conservationists practices were associated with a Geographic Information System (GIS). The previous analysis of the erosion potential can guide the establishment for recovery and environmental programs and monitoring of the mined area. The modification of environmental parameters in the studied basin for 1995 year and 2017 year helped as a soil loss comparison in the mined area, requiring implementation of remedial measures to develop stabilizing processes for the area and recovering the local ecosystem.

Keywords: Mining. USLE. Laminar erosion. Soil loss.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. PROBLEMÁTICA	15
1.2. JUSTIFICATIVA	16
1.3. OBJETIVO GERAL	16
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. MINERAÇÃO	18
2.2. A MINERAÇÃO NO DF	19
2.2.1 Extração de agregados para Construção Civil.....	19
2.2.2 Método de lavra: lavra a céu aberto	20
2.3. PROCESSOS EROSIVOS	21
2.3.1 Tipos de erosão.....	22
2.3.2 Fatores causadores.....	24
2.4. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (EUPS)	25
2.5. GEOPROCESSAMENTO	26
2.6. REMEDIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	30
3.2. COLETA DE DADOS	32
3.3. APLICAÇÃO DA EUPS	33
3.3.1 Determinação do fator R	33
3.3.2 Determinação do fator K.....	35
3.3.3 Determinação do fator LS	36
3.3.4 Determinação do fator CP	38
3.3.5 Cálculo da estimativa de erosão	39
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1. DELIMITAÇÃO DA BACIA	40
4.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA	41
4.3. FATOR R	45
4.4. FATOR K	47
4.5. FATOR LS	50

4.6. FATOR CP	51
4.7. CÁLCULO DA EUPS	56
4.8. MEDIDAS DE REMEDIAÇÃO	59
5. CONCLUSÕES	61
REFERÊNCIAS	63
ANEXO A.....	68
ANEXO B.....	69
ANEXO C.....	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Receitas operacionais da Vale.....	18
Figura 2.2 - Caminhão e escavadeira retirando o minério em cascalheira.....	20
Figura 2.3 - Formação de erosão em sulcos.....	23
Figura 2.4 - Formação de ravinas no relevo.....	23
Figura 2.5 - Vista aérea de voçorocamento.....	24
Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo.....	30
Figura 3.2 – Área degradada e os corpos hídricos adjacentes.....	31
Figura 3.3 – Mapa de localização das estações pluviométricas a serem utilizadas no cálculo do fator R.....	35
Figura 3.4 – Fluxograma das operações computacionais executadas no QGIS.....	39
Figura 4.1 – Delimitação da microbacia hidrográfica.....	40
Figura 4.2 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica.....	41
Figura 4.3 – Fator Erosividade R para a microbacia.....	46
Figura 4.4 – Distribuição dos tipos de solo da microbacia.....	48
Figura 4.5 – Fator Erodibilidade K para a microbacia com rede de drenagem.....	49
Figura 4.6 – Fator Comprimento de Rampa L e Declividade S para a microbacia.....	51
Figura 4.7 – Mapa de uso e cobertura do solo da microbacia no ano 1995.....	52
Figura 4.8 – Mapa de uso e cobertura do solo da microbacia no ano 2017.....	53
Figura 4.9 – Fator Uso e Manejo C e Práticas Conservacionistas P no ano 1995.....	55
Figura 4.10 – Fator Uso e Manejo C e Práticas Conservacionistas P no ano 2017.....	55
Figura 4.11 – Estimativa de erosão laminar pela EUPS para o ano 1995.....	57
Figura 4.12 – Estimativa de erosão laminar pela EUPS para o ano 2017.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Lista de dados coletados no estudo.....	33
Tabela 3.2 - Dados de localização das estações pluviométricas.....	34
Tabela 3.3 – Atribuição dos respectivos valores para o fator K dos solos da área de estudo proposto por Silva et al. (2004).....	36
Tabela 3.4 – Coeficientes do fator CP para cada tipo de uso do solo com base no trabalho de Stein <i>et al.</i> (1987).....	38
Tabela 4.1 – Classes do coeficiente de compacidade Kc.....	42
Tabela 4.2 – Classes do fator de forma F.....	43
Tabela 4.3 – Classes da densidade de drenagem Dd.....	44
Tabela 4.4 – Características morfométricas para a bacia recortada e para a bacia original....	44
Tabela 4.5 – Fator R de cada estação pluviométrica.....	45
Tabela 4.6 – Classes de erosividade da chuva média anual propostas por Santos (2008).....	47
Tabela 4.7 – Área em hectares e porcentagem dos tipos de solo.....	48
Tabela 4.8 – Classes de erodibilidade propostas por Gomes (2012).....	50
Tabela 4.9 – Fator CP em hectares e porcentagem dos tipos de uso e cobertura para os anos 1995 e 2017.....	53
Tabela 4.10 – Classificação da EUPS para as classes de perda de solo (ton/ha.ano). Grau de erosão segundo FAO, UNEP e UNESCO apud Alonso et al. (1994).....	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 – Equação Universal de Perda de Solo.....	26
Equação 3.1 – Fórmula do índice EI30.....	34
Equação 3.2 – Fórmula do fator R.....	34
Equação 3.3 – Fórmula do fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas Lij.....	37
Equação 3.4 – Fórmula do fator de declividade S.....	37
Equação 4.1 – Fórmula do coeficiente de compacidade Kc.....	42
Equação 4.2 – Fórmula do fator de forma F.....	42
Equação 4.3 – Fórmula do índice de circularidade IC.....	43
Equação 4.4 – Fórmula da densidade de drenagem Dd.....	43

LISTA DE ABREVIÇÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APA	Área de Proteção Ambiental
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
DF	Distrito Federal
EUPS	Equação Universal de Perda de Solo
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
NBR	Normas Brasileiras
PDOT	Plano Diretor de Ordenamento Territorial
QGIS	Quantum GIS
RA	Região Administrativa
RIDE	Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SR	Sensoriamento Remoto
SP	São Paulo
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

1. INTRODUÇÃO

Áreas degradadas por ações antrópicas estão, usualmente, ligadas a atividades ou empreendimentos socioeconômicos que alteram as características prévias do meio ambiente de determinada região. Diversos tipos de alteração podem caracterizar a degradação de uma área tais como a remoção da cobertura vegetal, prejuízo à biodiversidade, poluição da água e do solo por contaminantes e a perda dos horizontes superficiais do solo devido à erosão ou mineração.

Tanto no Brasil como no mundo, diversos processos produtivos dependem diretamente da exploração de recursos naturais que podem levar a rápidos processos de degradação do meio e à geração de passivos ambientais que devem ser recuperados. Segundo Corrêa (2007), o tema se fortaleceu no Brasil na década de 1980 e, de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Agricultura e a Alimentação, a degradação de terras é a deterioração ou perda total da capacidade dos solos para uso presente e futuro (Araujo *et al.*, 2005).

Dentre os vários tipos de degradação ambiental, a preocupação com áreas degradadas por mineração é notória devido ao grande impacto ambiental local e até mesmo regional que essa atividade econômica exerce. Segundo Macedo e Bordignon (1985), as alterações ambientais causadas pela mineração podem ser resumidas em: supressão de áreas de vegetação, alteração da superfície topográfica, impacto visual, aceleração dos processos erosivos, indução de escorregamentos, modificação do curso de água, aumento de turbidez e de sólidos em suspensão em corpos d'água, interceptação do lençol freático, mudança na dinâmica de águas subterrâneas, aumento de partículas em suspensão no ar, elevado nível de ruídos, lançamento de rochas a grandes distâncias, sobre pressão do ar e vibrações no solo, dentre outros.

A modificação das condições originais para condições inapropriadas ao meio ambiente em áreas mineradas é resultado da perda da estrutura física, química e biológica existentes anteriormente no local. Há três áreas de enfoque que visam à recuperação de áreas degradadas: revegetação, remediação e obras geotécnicas e, uma vez que visam recuperar os aspectos ambientais do meio, devem ser trabalhadas conjuntamente.

No contexto do Distrito Federal, a mineração predominante é de jazidas de minerais empregados na construção civil e, assim, as extrações de areia, cascalho, argila, calcário e saibro são as principais responsáveis pelas áreas degradadas. Conforme Corrêa (2004), no

DF esse tipo de mineração caracteriza-se, em geral, pelo baixo investimento, pela atividade praticada em pequenas e grandes extensões e pela ausência de significativo aporte de tecnologia nas fases de produção, controle ambiental e recuperação da lavra.

Segundo dados de 2018 da Terracap, areia, cascalho laterítico e calcário são as substâncias minerais com maior demanda no DF. A área total de processos minerários situados em terrenos de propriedade da Terracap é de 60.746,46 hectares, valor abaixo do total do DF por não levar em consideração propriedades privadas. Os principais fatores responsáveis pelo aumento da demanda por minerais para agregados da construção civil no DF, a partir de 1990, foram o crescimento populacional urbano e os processos desordenados de uso e ocupação territorial que, segundo Carneiro (1999), deixaram marcas importantes impressas na paisagem.

Dentre as diversas áreas mineradas no DF, a área de estudo está localizada na Região Administrativa do Pôr do Sol, na Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto. A área foi minerada para extração de areia e cascalho com cava a céu aberto para exploração de agregados de construção civil e não possui processo de recuperação. Dessa forma, a exposição do solo, devido a retirada da cobertura vegetal, levou ao desenvolvimento de processos erosivos que podem levar no assoreamento de cursos d'água próximos à área.

A avaliação de perdas de solo em geotecnia é uma área de vasto estudo devido a sua complexidade e consequências ambientais e econômicas. A análise de processos erosivos com enfoque na erosão laminar em um local minerado na Região Administrativa de Pôr do Sol por meio da Equação Universal de Perdas de Solos (EUPS) pode ser de fundamental importância devido à grande presença de nascentes, uma vez que locais minerados no DF há décadas liberam entre quatro e doze toneladas de sedimentos por hectare a cada ano (Corrêa, 1998b).

1.1. PROBLEMÁTICA

O trabalho possui como problemática a erosão do solo em área degradada por mineração a céu aberto e não recuperada, de modo que procura responder qual é a perda superficial de solo na região. A área degradada está próxima a nascentes que compõe a bacia hidrográfica do Rio Descoberto e a intensificação dos processos erosivos devido à exposição do solo ao

intemperismo requer remediação, sendo a EUPS (Equação Universal de Perda de Solo) uma difundida ferramenta de investigação e monitoramento.

1.2. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho analisa uma área degradada por mineração inserida, segundo o Mapa Ambiental do DF de 2014 (Anexo A), na Área de Proteção Ambiental (APA) do Planalto Central, administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Segundo o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) do DF de 2009, está presente na Zona Rural de Uso Controlado, que estipula a compatibilização das atividades desenvolvidas com a conservação dos recursos naturais, a recuperação ambiental, a proteção dos recursos hídricos e a valorização de seus atributos naturais, de acordo com as diretrizes de controle ambiental, de preservação dos recursos hídricos, de conservação do solo e de estradas e de controle de erosões.

Este estudo pode ser útil na determinação de medidas remediadoras para a erosão laminar. Espera-se que os dados deste trabalho possam ser extrapolados para outras áreas degradadas do Distrito Federal com características geológicas e geomorfológicas semelhantes, onde processos de erosão laminar normalmente se constituem um dos problemas ambientais.

1.3. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem por objetivo foi estimar a perda de solos por erosão laminar na bacia hidrográfica que abrange uma área degradada por mineração onde não foi feito processo de recuperação, na Região Administrativa de Pôr do Sol/DF.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos, o trabalho tem:

- Caracterizar os principais aspectos ambientais da área;

- Analisar aspectos morfométricos do terreno por meio de ferramentas de SIG e sensoriamento remoto;
- Calcular a perda do solo exposto antes e depois da atividade minerária;
- Estabelecer proposta de controle da erosão gerada.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo que o primeiro é a introdução com informações sobre a problemática do trabalho, a justificativa desta pesquisa, o objetivo geral e os objetivos específicos. O segundo capítulo é o referencial teórico, que dá um breve panorama sobre a atividade mineral no Brasil e a mineração no Distrito Federal, associando essa atividade antrópica a processos erosivos com tipos de erosão e fatores causadores. Foi utilizada a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), aliada a ferramentas de geoprocessamento para a estimativa da perda de solo na região em estudo. No terceiro capítulo, é apresentada a caracterização da área, bem como a coleta de dados e uma breve explicação de cada variável que compõe a EUPS. O quarto capítulo abrange os resultados e discussão a respeito da delimitação da bacia hidrográfica e sua caracterização morfométrica e a obtenção dos fatores da EUPS, com o cálculo da perda de solo para os anos 1995 e 2017 e sugestões para as medidas de remediação. O quinto e último capítulo traz um apanhado geral do trabalho, com a conclusão e análise final.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. MINERAÇÃO

A exploração mineral é uma importante e significativa atividade econômica na realidade mundial. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2013), a contribuição do setor minerário que era modesta no século 20, teve uma forte aceleração do crescimento da produção total da mineração a partir do século 21, principalmente em meados da década de 2000. Estes dados apontam para um aumento de menos de US\$ 10 bilhões do valor da produção em 2000 para cerca de US\$ 50 bilhões em 2011.

Além do relatório do setor de mineração do IBRAM estabelecer os números absolutos da geração de divisas desse setor econômico, o documento informa a grande produção de minério de ferro, responsável por mais de 50% da produção de minérios no mercado brasileiro, em que lideram os estados de Minas Gerais e do Pará, como ilustrado na Figura 2.1.

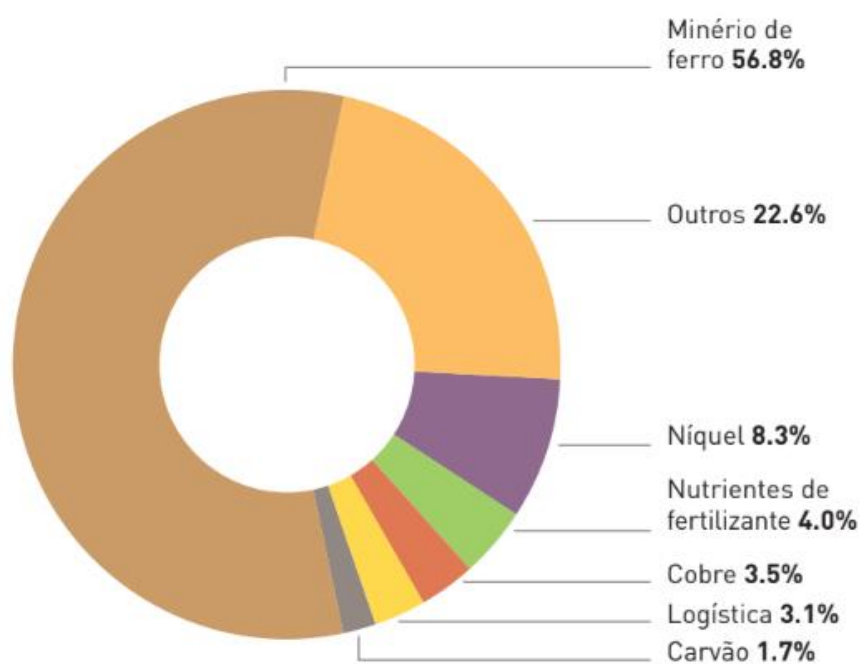


Figura 2.1 - Receitas operacionais da Vale. (IBRAM, 2013).

Sua importância econômica traz a ressalva quanto às medidas mitigadoras de impactos ambientais ocasionados pela atividade. Além do alto nível de degradação

ambiental, a mineração também é uma grande consumidora de água e energia e está sujeita às especificidades de cada localidade. Como descrito por Rezende (2017), a mineração caracteriza-se pelo “alto risco do empreendimento, exigência de altas taxas de retorno financeiro, singularidade de minas e jazidas, monitoramento ambiental específico, obrigação por parte do minerador de recuperar a área degradada, exauribilidade jazida”.

2.2. A MINERAÇÃO NO DF

Assim como em outras unidades da federação, a mineração tem sua parcela de influência na economia da capital federal. Segundo Rezende (2017), das principais atividades minerárias que ocorrem no DF, destaca-se a mineração de insumos para a indústria da construção civil, além da produção de insumos agrícolas, argilas, calcário para brita, pó calcário para agricultura e água mineral.

Segundo informações de 2018 da Terracap, no DF as áreas de latossolo ocupam 55% do território e são ricas em material argiloso e cascalho para pavimentação. Os cambissolos, por sua vez, ocupam 31% do território da área federativa e fornecem cascalho para pavimentação. Outras classificações, como as areias quartzosas (neossolos quartzarênicos) são áreas fornecedoras de areia para construção civil.

A necessidade de extração dos minerais e agregados para construção civil está ligada à taxa de crescimento demográfico do DF, que no período 2013/2014 foi estimada em 2,25%, o segundo maior crescimento no país (BRASIL, 2014). Quando feita em áreas próximas a centro urbanos em expansão, a extração contribui para baratear e facilitar o comércio dos produtos minerados.

2.2.1 Extração de agregados para Construção Civil

Agregados para a construção civil são materiais granulares sem forma ou volume definidos que podem ser classificados considerando-se a origem, a densidade e o tamanho dos fragmentos (Almeida e Luz, 2009). São as pedras britadas, o cascalho e as areias naturais ou obtidas por moagem de rocha. São considerados também as argilas e outros materiais como resíduos inertes reciclados. Podem ser naturais, que se encontram de forma particulada na natureza, ou artificiais, produzidos por algum processo industrial.

Conforme Rezende (2017), o uso dos minerais de uso direto na construção civil ocorre com agregados médios e finos usualmente usados para preenchimento ou gerar rigidez numa mistura e são insumos básicos de edificações, estradas, instalações urbanas e industriais, terminais aeroportuários e demais construções. Espaços construídos demandam agregados, ainda que sejam edificações de madeira ou arquitetura com estrutura de aço ou outros metais, os agregados são utilizados seja nas fundações, em pisos ou em alguns acabamentos.

2.2.2 Método de lavra: lavra a céu aberto

No contexto da mineração no DF, o método largamente empregado para extração mineral é a lavra a céu aberto (Figura 2.2). Esta alternativa é empregada usualmente quando as camadas do mineral são aproximadamente horizontais e ocorrem em profundidades pequenas e reduzida espessura de cobertura de estéril (Aguilar *et al.*, 2008), tais como areia e cascalho.

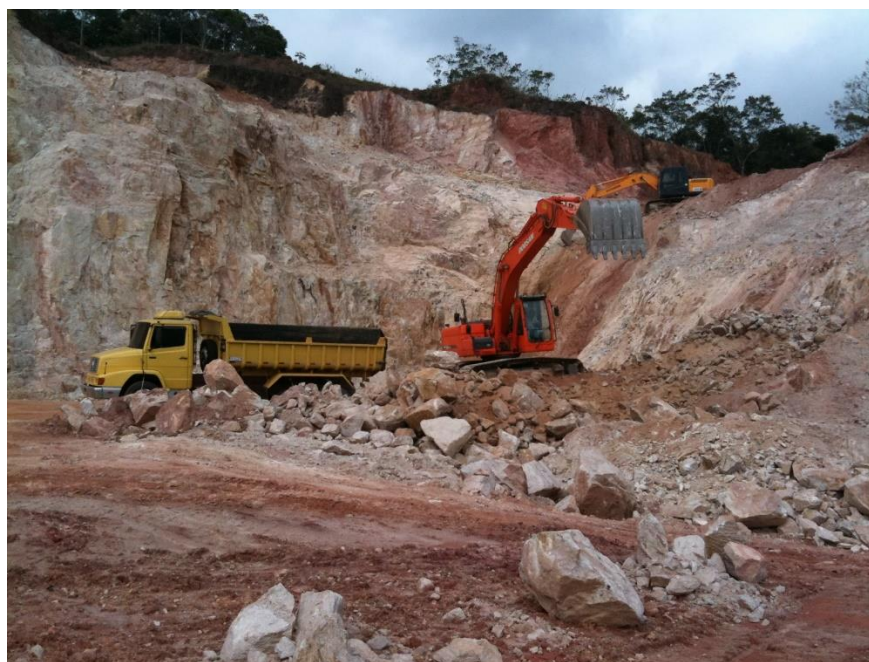


Figura 2.2 - Caminhão e escavadeira retirando o minério em cascalheira. (MB Geologia e Meio Ambiente, 2020)

Nesse método, a lavra começa com o desmatamento e a retirada da camada de solo. O solo é removido e estocado nas áreas adjacentes. A remoção das camadas de solo e subsolo

neste tipo de mineração causa à queda da fertilidade do solo, destruição da fauna e flora, alterações topográficas e inutilização do solo (Vargas, 1998).

A cobertura de solo que recobre as camadas do mineral a ser extraído é removida no estágio inicial da lavra. Esse tipo de lavra envolve, genericamente, a retirada de grandes quantidades de estéreis, camada de solo que está acima do minério, podendo causar um sério impacto ambiental caso a lavra não seja adequadamente planejada e a recuperação da área definida e executada desde seu início (Koppe, 2002).

Segundo o relatório da FAO (2015), ainda que as operações de mineração afetem áreas relativamente pequenas, paisagens inteiras são destruídas para alcançar o minério, deixando cicatrizes permanentes e problemas ambientais significativos causados por depósitos e carreamento de rejeitos e estéril.

Os poluentes e sedimentos podem ser transferidos para áreas vizinhas por lixiviação da mina ou por deposição eólica de poeira, sendo que a incidência desses problemas depende de condições climáticas e hidrológicas locais. Outros efeitos ambientais, além dos causados por poluentes e sedimentos, incluem formação de sumidouros, desmatamento e erosão (FAO, 2015).

2.3. PROCESSOS EROSIVOS

Segundo relatório da FAO (2015), as atividades humanas tais como lavouras, expansão urbana, desmatamento e atividades industriais e de mineração contribuem diretamente para a alteração de condições naturais iniciais de uma área. Como supracitado, no caso da mineração, alguns aspectos ambientais como topografia, microclima e biodiversidade são alterados diretamente pela atividade antrópica e essa alteração pode ser agravada ao longo do tempo se medidas de recuperação não forem executadas.

Quando as precipitações intensas atingem solos rasos e com pouca ou nenhuma cobertura vegetal, o solo é facilmente erodido. O material transportado de rejeitos e estéreis e a perda de solo pode ser levado até corpos hídricos, intensificando os processos de assoreamento e possível contaminação. Isso faz com que o solo atue como fonte difusa, aumentando o risco à saúde pública da região (Mouri *et al.*, 2011).

Assim, é possível relacionar a extração mineral como uma atividade que auxilia o aumento da erosão, principalmente em áreas de lavra com retirada de cobertura vegetal para abertura das cavas e nos locais de depósito de rejeito e estéril (Martín Duque *et al.*, 2015), uma vez que deixam o solo exposto aos agentes erosivos, aumentando o risco de assoreamento e eutrofização de corpos hídricos.

2.3.1 Tipos de erosão

Segundo Carvalho (1994) *apud* Gomes (2012), existem duas formas de erosão: a geológica e a acelerada. A erosão geológica ou geomorfológica acontece normalmente, sendo também chamada de natural ou normal. Ela envolve a remoção das partículas ou materiais e o seu transporte sem intervenção humana. Por outro lado, a erosão acelerada ou antrópica é aquela provocada pela ação humana.

A erosão laminar é um processo que ocorre com o carreamento de partículas quando há escoamento da água que não infiltra, dependendo principalmente da densidade das partículas, da velocidade do escoamento, da espessura da lâmina d'água e da inclinação do relevo. Outro tipo de erosão é a erosão interna ou *piping* que constitui um fenômeno subterrâneo de percolação da água que carrega partículas no interior do solo, com a formação de cavidades e, no geral, é mais difícil de ser identificada (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006).

Dentre os processos erosivos, vale salientar a preocupação com os processos de erosão em sulcos, ravinas e voçorocas. Para Camapum de Carvalho *et al.* (2006), na erosão em sulcos (Figura 2.3), o material é transportado pelo escoamento e desgaste do solo formando “pequenos cortes” que podem se desenvolver formando ravinas e, posteriormente, voçorocas. A canalização da água sobre a superfície do solo pode evoluir para ravinas (Figura 2.4), que ocorrem quando a água escoar pela declividade do terreno abrindo cavidades maiores ao longo do tempo.



Figura 2.3 - Formação de erosão em sulcos. (Brasil Escola, 2020).



Figura 2.4 - Formação de ravinas no relevo. (Brasil Escola, 2020).

Ao perpetuar o processo erosivo, os canais de escoamento podem aumentar em largura e profundidade, que atingindo o lençol freático, gerarão as voçorocas (Figura 2.5). As voçorocas ocorrem pela a somatória do conjunto de vários tipos de erosão, que atingem

o lençol freático por meio da infiltração da água no solo, dando passagem ao escoamento da água sobre a superfície, se agravando nas encostas e, assim, se caracteriza como um tipo de erosão que ocasiona desbarrancamento de taludes e grandes processos de assoreamento.



Figura 2.5 - Vista aérea de voçorocamento. (Brasil Escola, 2020).

2.3.2 Fatores causadores

Uma vez que as erosões ocorrem de maneira natural ou acelerada por intervenção humana, vários são os fatores que influenciam nesse processo sendo eles: o relevo com as variadas formas das vertentes, a declividade, a intensidade das chuvas, a pedologia, bem como o uso e cobertura do solo (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006). Quando há mudança brusca no solo por consequências de atividade humana, há um desequilíbrio que torna mais lento o processo de regeneração da vegetação e que pode desenvolver a perda das camadas do solo e modificar suas propriedades.

Alguns processos erosivos são definidos por ação da água da chuva, que desintegram as partículas do solo e provocam o seu transporte. Conforme Guerra *et al.* (1999) *apud*

Gomes (2012), as perdas de solo por erosão hídrica são comandadas por diversos fatores relacionados às condições naturais do terreno, destacando-se: a chuva, a cobertura vegetal, a topografia e os tipos de solo. Este trabalho tratou das questões ligadas à erosão laminar, que ocorre, na maioria das vezes, em presença de águas pluviais.

Para Camapum de Carvalho *et al.* (2006), a chuva é definida como um dos fatores climáticos mais importantes responsáveis pelo processo da erosão, principalmente em solos tropicais como é o caso do DF. A intensidade e a periodicidade das chuvas são destacadas como fatores principais do agente causador da erosão capaz de modificar o suporte do solo, alterando sua estrutura.

Outro fator agravante que auxilia no processo erosivo é a infiltração, capaz de movimentar as partículas de água no interior do solo. Deste modo, observa-se a grande importância do tipo de solo local e da presença de cobertura vegetal que, respectivamente, definem a erodibilidade do solo e a taxa de infiltração de água no solo, possibilitando ou não o processo erosivo. (Lima, 1999).

A cobertura vegetal comporta-se como uma defesa natural contra a ação da erosão do terreno. A presença da cobertura vegetal permite a proteção direta contra o impacto da chuva sobre o solo, a dispersão da água pela presença das raízes das plantas, a maior qualidade do solo pela maior retenção de matéria orgânica e o aumento a taxa de infiltração da água (Santos, 2017).

2.4. EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLO (EUPS)

Neste trabalho foi utilizada para a determinação da perda superficial do solo a Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), desenvolvimento por Wischmeier e Smith (1978), baseado em resultados obtidos pelo uso de simuladores de chuva, para momentos distintos da área de estudo: antes da instalação da atividade minerária e a área já degradada com solo exposto.

A EUPS é um modelo de erosão desenvolvido para calcular a quantidade média de perda de solo em períodos longos, em unidades de $t. ha^{-1}. ano^{-1}$, para processos de erosão por ação hídrica (Wischmeier e Smith, 1978), sendo um modelo útil, principalmente, para

áreas rurais, embora seja considerado aplicável também em locais de construção civil e urbanização.

Tornou-se uma equação amplamente conhecida e divulgada pela facilidade de utilização e é originada pela relação dos fatores climáticos, de solo, de comprimento de rampa, declividade e antrópicos, conforme Equação 2.1.

$$A=R.K.L.S.C.P \qquad \text{Equação (2.1)}$$

Sendo:

- A - Perda de solo calculada por unidade de área (t/ha.ano).
- R - Fator chuva: índice de erosão pela chuva (MJ.mm/ha.h.ano).
- K - Fator erodibilidade do solo: susceptibilidade de diferentes solos serem erodidos de acordo com suas características físicas e químicas (t.ha.h/MJ.mm.ha).
- L - Fator comprimento do declive: a relação de perdas de solo entre um comprimento de declive qualquer e um comprimento de rampa de 25 metros para o mesmo solo e grau de declive.
- S - Fator declividade: a relação de perdas de solo entre um declive qualquer e um declive de 9% para o mesmo solo e comprimento de rampa.
- C - Fator uso e manejo: a relação entre perdas de solo de um terreno cultivado em certas condições e as perdas correspondentes de um terreno mantido continuamente descoberto, isto é, nas mesmas condições em que o fator K é avaliado.
- P - Fator práticas conservacionistas: a relação entre as perdas de solo de um terreno cultivado com determinada prática e as perdas quando se planta morro abaixo.

2.5. GEOPROCESSAMENTO

A Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) tem sido usada em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG) com o objetivo de fornecer subsídios ao planejamento ambiental. Dados de Sensoriamento Remoto (SR) tem sido usado para mapear a face mais dinâmica da erosão: o uso e o manejo do solo (Magalhães Filho et al., 2014). Portanto, o geoprocessamento pode ser entendido como sendo a utilização de técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação sobre objetos ou fenômenos

geograficamente identificados, razoavelmente aplicável para o estudo de caso deste trabalho.

Segundo Moreira (2001), qualquer SIG apresenta duas características principais: permite inserir e integrar, numa base única de dados (banco de dados), informações espaciais provenientes de diversas fontes, tais como: cartográficas, imagens de satélites, dados censitários, dados de cadastro rural e urbano, dados de redes e de MDE (Modelo Digital de Elevação); e oferece mecanismo para combinar várias informações através de algoritmos de manipulação e análise, bem como de consulta, recuperação, visualização e plotagem do conteúdo dessa base de dados georreferenciados.

Com a utilização de modelos que requerem dados espaciais, os SIG têm uma grande facilidade em manipular esses dados, de maneira a permitir uma análise espacial e temporal de informações sobre erosão e poluição. A integração de modelos ambientais e SIG é um vasto campo de estudo ligado ao geoprocessamento, meio ambiente, agricultura e mineração.

Além da utilização da EUPS, é possível delimitar uma microbacia que abrange a área degradada em estudo utilizando geoprocessamento e, assim, fazer uma análise morfométrica da localidade. Para Soares e Souza (2012), esse tipo de análise possibilita a identificação de características gerais significativas em uma bacia hidrográfica, principalmente, quando se relaciona características geomorfológicas como tamanho da bacia, declividade e rede de drenagem a processos ambientais externos.

As pesquisas em bacias hidrográficas facilitam o acompanhamento das alterações naturais ou introduzidas pelo homem (Rodrigues *et al.*, 2008) e, segundo Freire *et al.* (2013), a análise morfométrica tem um papel importante em estudos hidrológicos e ambientais, uma vez que possibilita uma avaliação dos aspectos físicos de uma bacia e um melhor entendimento da modificação dos recursos.

Portanto, a caracterização morfométrica da região de estudo com ênfase na influência do solo exposto de uma área minerada em corpos hídricos pode auxiliar na análise ambiental por SIG e tem como objetivo esclarecer questões relacionadas ao entendimento da dinâmica ambiental local.

2.6. REMEDIAÇÃO DE PROCESSOS EROSIVOS

Uma análise prévia do local degradado é importante para avaliar as condições da região, abrangendo os dados históricos e sua evolução. É possível obter um projeto bem-sucedido de remediação através do conhecimento do local e a forma como a ação antrópica ou natural modifica a paisagem atual.

O controle da erosão é um estudo de grande relevância na área geotécnica. Para a recomposição do solo degradado, é necessária a avaliação de profissionais que possibilite a minimização do carreamento de partículas para ser feito o recobrimento com uma vegetação adequada capaz de fornecer ao solo os nutrientes necessários para sua recomposição.

Na geotecnia, as principais obras que controlam e recuperam as áreas atingidas por erosões são (Camapum de Carvalho *et al.*, 2006): condicionamento do fluxo da água através inserção de sistemas de drenagem, retaludamento das obras, recobrimento da vegetação, obras de contenção de taludes, reaterro e barramento de encostas de taludes.

Segundo Rivas (2006), a remediação de processos erosivos deve ocorrer em duas etapas: controle da erosão a curto prazo, seguido pelo estabelecimento de vegetação para controle a longo prazo, já que a recuperação biogeotécnica utiliza elementos mecânicos, como muros de contenção, e biológicos, plantas para estabilização, a fim de prevenir processos erosivos severos.

A Norma ABNT – NBR 13030 é a responsável por fixar diretrizes para elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas pelas atividades de mineração, visando a obtenção de subsídios técnicos que possibilitem a manutenção e/ou melhoria da qualidade ambiental, independente da fase de instalação do projeto (ABNT, 1999).

Segundo Balasubramanian (2017), “existem cinco técnicas principais que podem ser usadas no controle da erosão do solo: cercas de contorno e agricultura, cultivo em faixas, terraços, recuperação de ravinas e correias de abrigo”. Essas técnicas são aplicadas de forma a minimizar a perturbação que acarreta na erosão do solo.

A forma mais eficiente de controle da erosão é minimizar a área de perturbação, retendo o máximo possível da vegetação existente e é especialmente importante em encostas íngremes ou nas proximidades de corpos d'água, onde nenhuma medida isolada controlará

adequadamente a erosão e onde os ambientes receptores podem ser altamente sensíveis (Balasubramanian, 2017).

De acordo com a NBR 13030, na elaboração e apresentação do projeto de reabilitação de áreas degradadas pela mineração deve constar informações sobre: conformação topográfica e paisagística, estabilidade, controle de erosão e drenagem, adequação paisagística, revegetação e monitoramento. No escopo deste trabalho, foram estabelecidas sugestões para a remediação da perda erosiva superficial na área minerada de acordo com as características socioambientais da região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os estudos para quantificação da erosão laminar foram realizados considerando as características do solo de área degradada por mineração próxima à DF-070 na Região Administrativa de Pôr do Sol, situada no Distrito Federal (Figura 3.1). A área está inserida Unidade Hidrográfica do Rio Melchior, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Descoberto segundo o Mapa Hidrográfico do DF de 2016 (Anexo C) e está inserida na Área de Proteção Ambiental (APA) do Planalto Central segundo o Mapa Ambiental do DF de 2014 (Anexo A).

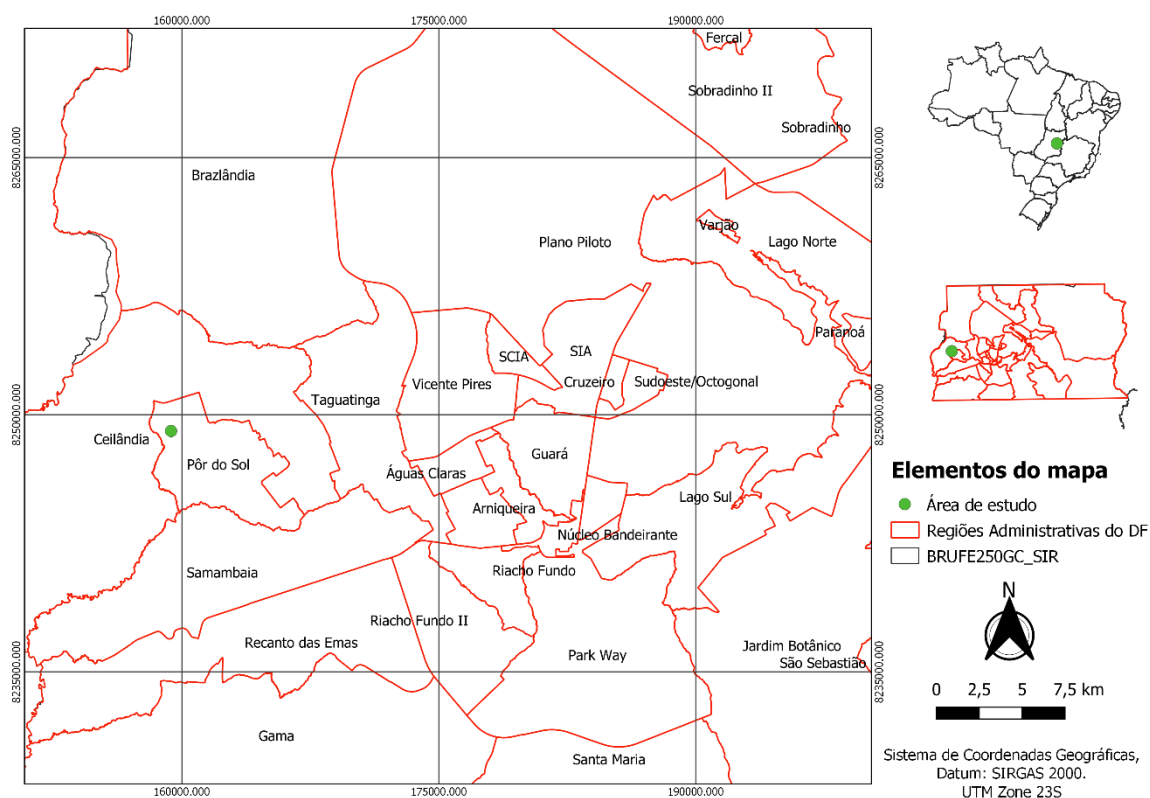


Figura 3.1 - Mapa de localização da área de estudo.

A Figura 3.2 ilustra a escala da área de estudo, bem como sua proximidade com os corpos hídricos Córrego Vereda, Córrego das Corujas e Córrego Guariroba e seus tributários. É possível visualizar também a proximidade com a expansão urbana das quadras QNR da Região Administrativa da Ceilândia.

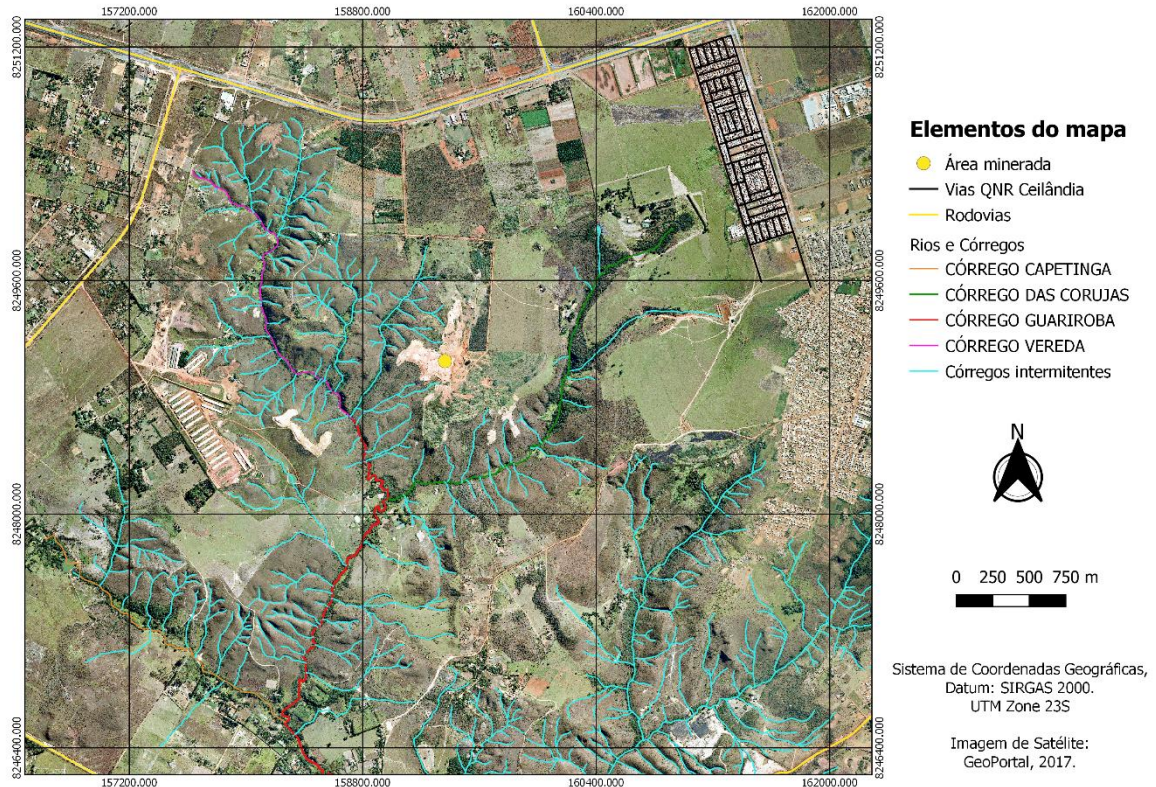


Figura 3.2 – Área degradada e os corpos hídricos adjacentes.

Na localidade, os tipos de solos presentes são o latossolo vermelho, o latossolo vermelho-amarelo e o cambissolo, segundo Mapa de Reconhecimento de Solos da Embrapa de 1978 (Anexo B). Dentro da análise de processos erosivos, os tipos de solo representam uma característica importante na susceptibilidade a erosão. Dados da Embrapa (2004) informam que latossolos são solos fortemente intemperizados, geralmente profundos e com alta permeabilidade de água, enquanto que cambissolos são solos menos profundos associados a relevos mais acentuados e com teores mais elevados de silte.

A área em estudo está localizada nas coordenadas geográficas de N 8249045 E 159362 da zona UTM 23S, com clima tropical bem dividido entre estação seca e estação chuvosa, com temperaturas médias mensais sempre superiores a 18 °C e precipitação média de 1.540 milímetros anuais, concentrados entre os meses de outubro e abril, ocorrendo sob a forma de chuva e, algumas vezes, de granizo. Durante a estação seca (maio a setembro), os níveis de umidade relativa do ar caem bastante, ficando muitas vezes abaixo de 30%.

O recobrimento vegetal da região possui, principalmente, formações de mata ciliar e mata de galeria adjacentes aos córregos, formação de Cerrado campestre entremeada por

vegetação savânica em áreas não modificadas antropicamente e áreas onde a cobertura vegetal foi suficientemente removida para que restassem gramíneas, prática permitida pelo Código Florestal (BRASIL, 2012) para limpeza do terreno em imóveis rurais.

Conforme o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do DF de 2019, a região se encontra na categoria de Zona Ecológico-Econômica de Dinamização Produtiva com Equidade (ZEEDPE) e é destinada a diversificar as bases produtivas com inclusão socioeconômica compatível com os riscos ecológicos e os serviços ecossistêmicos, definição favorável à atividade econômica de mineração, desde que sejam observadas as exigências do licenciamento ambiental.

O método da pesquisa foi fundamentado em um estudo de caso realizado na microbacia que envolve a área minerada, composta por córregos intermitentes e pelos córregos principais: Córrego Vereda, Córrego das Corujas e exutório que desagua no Córrego Guariroba. Foi realizado o levantamento de dados com imagens multitemporais de satélite e dados de curvas de nível da microbacia, conforme Modelo Digital de Elevação (MDE), a fim de constatar a dinâmica da erosão laminar na área e apresentar métodos de remediação.

3.2. COLETA DE DADOS

Os dados para caracterização da região de estudo foram obtidos a partir de arquivos em formato vetorial (*shapefile*) da topografia, hidrologia, vias e rodovias, uso e ocupação do solo e limites de fronteira do DF contidos no *site* GeoPortal, plataforma gerenciada pela Secretaria de estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação. Sistema de Projeção e DATUM: SIRGAS 2000. O limite da microbacia foi delimitado a partir do *software* QGIS 3.4.12 para os dados colocados de input no item 4. “Resultados e Discussão” deste trabalho.

Para o mapeamento dos processos erosivos antes e após a atividade minerária foi utilizada a classificação do uso do solo elaborado pelo GDF com imagens de alta resolução espacial para o ano 1995 e o ano 2017. A classificação do uso da terra foi atualizada no presente estudo utilizando interpretação visual e análise topográfica da área para os respectivos anos.

O relevo foi apresentado a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE), calculado a partir de curvas de nível do DF do ano 2009 com equidistância de 5 metros. Foram utilizados dados disponíveis no *site* GeoPortal, tais como dados vetoriais de rede de drenagem e dados matriciais (*raster*) de imagem.

Os dados de precipitação foram obtidos pelo *site* da Companhia de Água e Esgotos de Brasília - CAESB, companhia que opera as estações pluviométricas utilizadas para o presente trabalho. Também foi utilizado o Mapa de Reconhecimento dos Solos do DF elaborado pela Embrapa em 1978 na escala 1:100.000 para identificação das classes de solo da área de estudo. O resumo dos dados utilizados para a análise de perda de solo está listado na tabela abaixo (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 – Lista de dados coletados no estudo.

Dado coletado	Tipo	Ano	Fonte
Dados pluviométricos	<i>Shapefile</i>	1995-2017	CAESB
Imagem de satélite	<i>Raster</i>	1995	GeoPortal
Imagem de satélite	<i>Raster</i>	2017	GeoPortal
Curvas de nível de 5m	<i>Shapefile</i>	2009	GeoPortal
Dados pedológicos	<i>Shapefile</i>	1978	Embrapa

3.3. APLICAÇÃO DA EUPS

Para quantificar a perda anual de solo por erosão é preciso ter conhecimento das variáveis que interferem nesse processo. Neste sentido, a EUPS inclui os fatores que, calculados individualmente, permitem com a aplicação do modelo a perda de solos potencial para a área de estudo.

3.3.1 Determinação do fator R

O cálculo do fator R foi baseado no índice EI30 proposto por Lombardi Neto e Moldenhauer (1992). Segundo Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), estudos realizados em Campinas (SP) demonstraram alto coeficiente de correlação para a regressão linear entre o índice médio mensal de erosão e o coeficiente chuva. Diante disso, propuseram a Equação 3.1:

$$EI_{30} = 67,355 * (r^2/P)^{0,85} \quad \text{Equação (3.1)}$$

Sendo:

- EI_{30} = média mensal do índice de erosividade ($MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}$);
- r = precipitação média mensal (mm);
- P = precipitação média anual (mm).

O fator erosividade da chuva (R) é obtido pela soma dos valores mensais dos índices de erosão. De acordo com Equação 3.2:

$$R = \sum_{i=1}^{12} EI_{30} \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Para determinação do fator R foram identificadas onze estações pluviométricas no DF operadas pela CAESB – Companhia de água e Esgoto de Brasília, as quais possuíam registros pluviométricos de, no mínimo, 10 anos, localizadas nas proximidades da unidade hidrográfica do Rio Melchior e dentro do território da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE) (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Dados de localização das estações pluviométricas.

Nº	Código	Estação	RA/Estado	Altitude	Período
1	1547018	Jockey Club	Guará	1103	1995-2015
2	1548006	ETA Taguatinga	Taguatinga	1269	1995-2006
3	1548010	ETE Riacho Fundo	Riacho Fundo	1185	1995-2009
4	1548007	ETA - Brazlândia	Brazlândia	1098	1995-2008
5	1548034	ETE - Melchior	Samambaia	1022	2008-2017
6	1548033	ETE – Recanto das Emas	Recanto das Emas	1117	2008-2017
7	1548008	Descoberto	Ceilândia	1061	1995-2017
8	1548030	Macacos (Cidade Eclética)	Goiás	895	2003-2017
9	1648015	Areias – Faz. São Bento	Goiás	860	2008-2017
10	1547017	ETA Santa Maria	Plano Piloto	1078	1995-2017
11	1548005	Gama ETE Alagado	Gama	980	2004-2017

Cada estação climatológica foi localizada na região de estudo (Figura 3.3) utilizando as coordenadas geográficas de cada estação (Tabela 3.2).

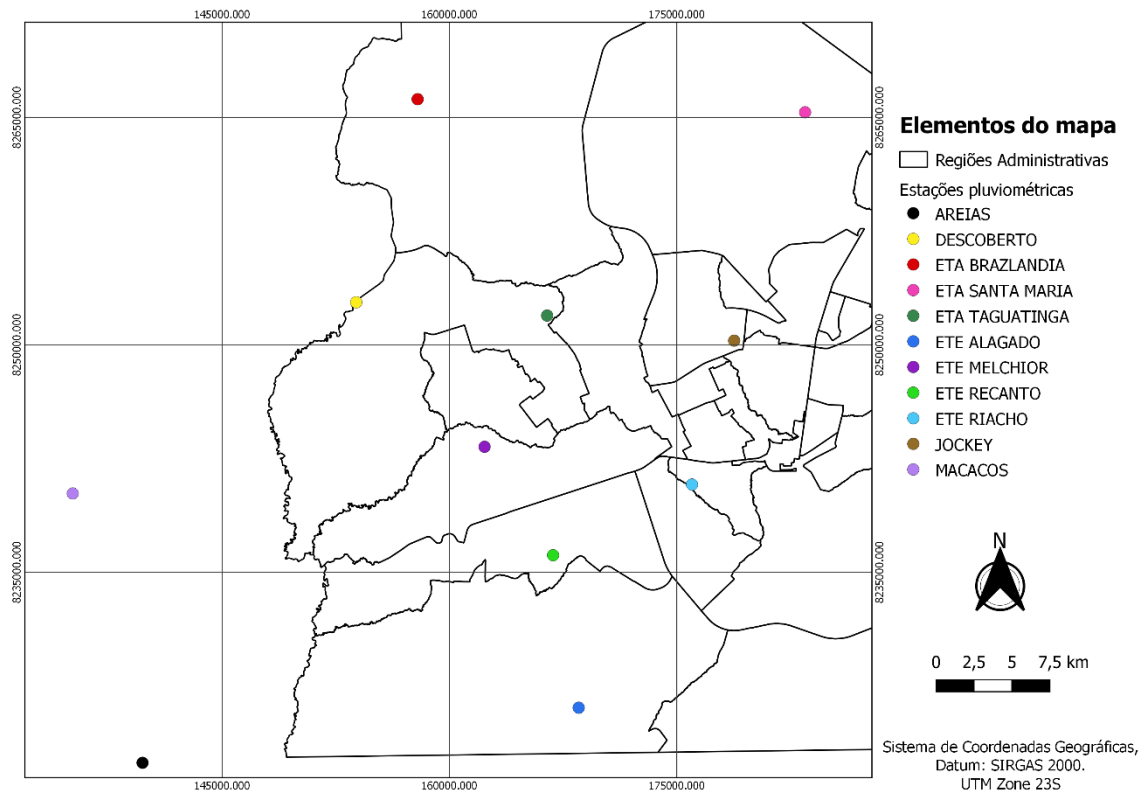


Figura 3.3 – Mapa de localização das estações pluviométricas a serem utilizadas no cálculo do fator R.

A partir dos dados de erosividade obtidos através do método EI30 para cada estação, foi possível espacializar as informações utilizando o procedimento de interpolação, pelo método de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW), utilizando o *software* QGIS 3.4.12. Ao final, foi gerado o mapa de erosividade da chuva para toda a região da microbacia dos Córrego Vereda, Córrego das Corujas e Córrego Guariroba.

3.3.2 Determinação do fator K

A variável K da EUPS determina a erodibilidade do solo. Segundo Bertoni e Lombardi Neto (2012), o fator K está diretamente relacionado com as propriedades e características de cada tipo de solo, uma vez que a “erodibilidade está relacionada com as propriedades dos solos em relação à água e que afetam fatores como: a) velocidade de infiltração, b) permeabilidade e capacidade total de armazenamento de água, c) resistência às forças de dispersão, salpico, abrasão e transporte pela chuva e escoamento”.

Assim, o fator K pode ser determinada por métodos diretos ou indiretos. Os métodos diretos envolvem determinações *in situ*, com chuva natural e/ou simulada, além de esforço devido a necessidade de tempo e recursos financeiros. Diante de tal situação tornou necessária a estimativa do fator K por meios mais simplificados, denominados métodos indiretos (Mannigel et al., 2008).

Nesta pesquisa, foi utilizado o mapa de reconhecimento dos solos do Distrito Federal elaborado em 1978 na escala de 1:100.000 pela Embrapa (Anexo B) e atualizado pelo GDF (2009), para a identificação dos tipos de solo presentes na área de estudo. Para tipo de solo foi atribuído um escore segundo valores médios do parâmetro físico-químico apresentado por Silva (2004) (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Atribuição dos respectivos valores para o fator K dos solos da área de estudo proposto por Silva (2004).

Classe de solos	Valores de K (t.ha.h/mj.mm.ha)	
Latossolo Vermelho (LV)	LVd3	0,014
Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA)	LVAAd2	0,032
	LVAAd4	0,032
	LVAAd5	0,032
	LVAAd11	0,032
	LVAAd14	0,032
Cambissolo (CX)	CXd9	0,048
	CXd14	0,048

3.3.3 Determinação do fator LS

A EUPS utiliza o fator comprimento de rampa (L), que é adimensional, adotando o comprimento de rampa medido em metros, sem a unidade. Já o fator declividade (S), é caracterizado como o ângulo ou o índice de inclinação do terreno. Dentre as variáveis utilizadas no modelo da EUPS, a que possui maior dificuldade para ser estimada em ambiente computacional é o comprimento de rampa (Minella *et al.*, 2010). Visando

automatizar o processo, várias metodologias vêm sendo propostas. Dentre elas, a utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em ambiente SIG tem ganhado destaque.

Para o cálculo do fator de comprimento de rampa (L) foi utilizado o algoritmo proposto por Desmet e Govers (1996), cujo algoritmo usa o conceito de área acumulada e direções de fluxo, obtido pela declividade e da área do pixel que será a unidade básica. Assim, o fator de comprimento de rampa (L), de acordo com a Equação 3.3 de Desmet e Govers (1996) é:

$$L_{ij} = \left[(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1} \right] / [D^{m+2} * X_{i,jm} * (22,13)^m] \quad (\text{Equação 3.3}).$$

Sendo:

- $L_{i,j}$: fator de comprimento de vertente de uma célula com coordenadas (i, j);
- $A_{i,j-in}$: área de contribuição de uma célula com coordenadas (i, j) (m^2);
- D: tamanho da grade de células (m);
- $X_{i,j}$: valor da direção do fluxo; e
- m: coeficiente que assume valores entre 0,2 a 0,5, dependendo da declividade, assim:

$m = 0,5$ se a declividade for $> 5\%$;

$m = 0,4$ para o intervalo de 3 a 5%;

$m = 0,3$ para o intervalo de 1 a 3%; e

$m = 0,2$ para grau de declividade $< 1\%$.

O fator de declividade (S) foi obtido segundo a metodologia de Wischmeier e Smith (1978), conforme Equação 3.4, em que a declividade (s) foi determinada por meio do software QGIS.

$$S = 0,00654*s^2 + 0,0456*s + 0,065 \quad (\text{Equação 3.4}).$$

Sendo:

- S: fator de declividade (adimensional);
- s: declividade média da vertente (%).

3.3.4 Determinação do fator CP

Para a definição dos fatores C e P, relacionados às classes de uso e ocupação de solo, foi utilizado o procedimento descrito por Stein *et al.* (1987). Para integrar os fatores C e P, o fator P foi adotado constante e igual a 1, segundo valores adotados de acordo com práticas conservacionistas. A atribuição desse peso para o fator P ocorre por ser considerada a situação de maior perda de solo, ou seja, não há a presença de técnicas ou práticas conservacionistas nos diversos usos do solo. Foi adotado este valor pela dificuldade em conseguir valores confiáveis de P quando se utilizam técnicas de geoprocessamento.

Primeiramente, para determinação do fator C foi realizada a análise dos mapas de uso e cobertura da terra disponibilizados, utilizando imagens de satélite e fotografias tiradas da região de estudo. A partir desse mapeamento, foram atribuídos pesos para cada tipo de uso do solo e os valores a serem utilizados foram adaptados da metodologia proposta por Stein *et al.* (1987) (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Coeficientes do fator CP para cada tipo de uso do solo com base no trabalho de Stein *et al.* (1987).

Classes de Uso do Solo	Valores de CP
Agricultura (cultura grãos, olericultura)	0,2000
Área urbana (com e sem infraestrutura)	0,0001
Cerrado (sentido amplo)	0,0007
Chácaras (chácaras de uso misto)	0,0100
Corpos d'água (represas, rios, lagos)	0,0000
Mata de galeria (mata ciliar e de galeria)	0,0001
Pastagem (área destinada ao gado, retirada de vegetação)	0,0100
Reflorestamento (nativas e eucalipto)	0,0001
Solo exposto (áreas degradadas, mineração)	0,2500

3.3.5 Cálculo da estimativa de erosão

Após determinação de todos os fatores da EUPS, foi estimada a perda de solos de acordo com a metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1978). Essa operação foi realizada utilizando ferramentas do *software* QGIS, onde foram inseridos mapas gerados (matrizes numéricas) correspondentes aos fatores R, K, LS e CP da equação. As matrizes numéricas em questão foram georreferenciadas, sobrepostas espacialmente e multiplicadas entre si através de operações de análise espacial, conforme o fluxograma da Figura 3.4.

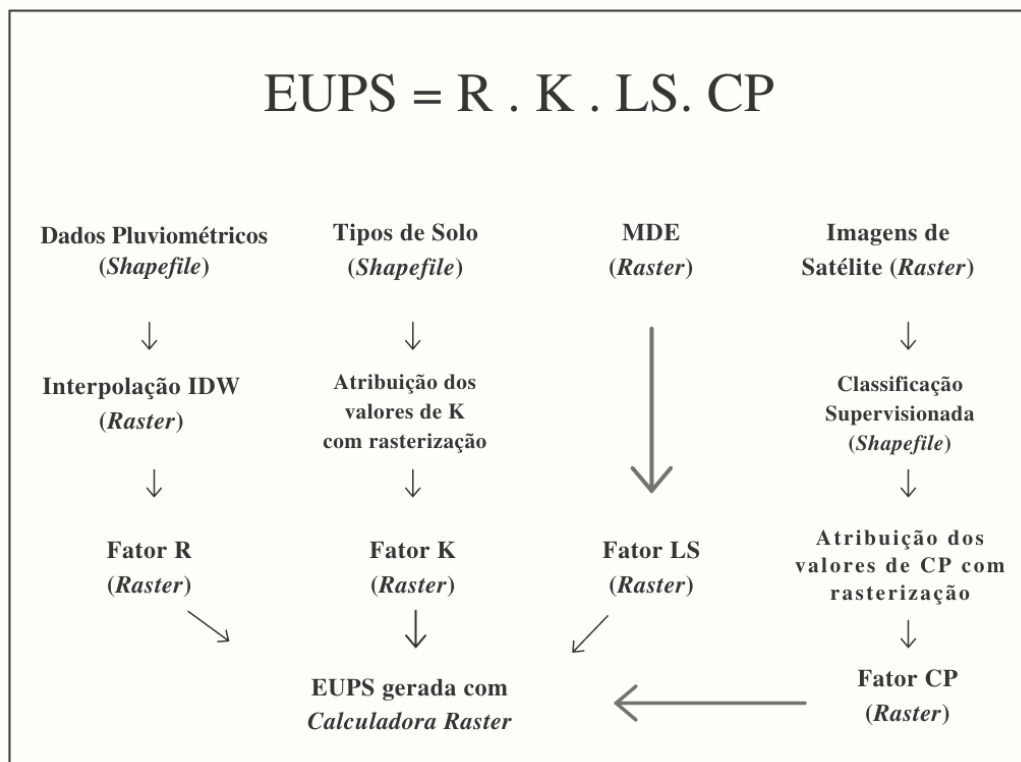


Figura 3.4 – Fluxograma das operações computacionais executadas no QGIS.

Para a obtenção desses mapas, as informações georreferenciadas foram cruzadas com as informações geradas pela aplicação da EUPS. Na sobreposição, foi possível identificar as áreas de menor e maior potencial de erosão superficial, bem como as modificações críticas com a implantação de uma área minerada na microbacia dos cursos hídricos Córrego Vereda, Córrego das Corujas e Córrego Guariroba, para anos distintos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. DELIMINATAÇÃO DA BACIA

A bacia foi delimitada utilizando o *software* QGIS 3.14.12 com o dado de entrada do Modelo Digital de Elevação (MDE) em duas etapas: foi utilizada a ferramenta GRASS “*r.watershed*” para gerar, dentre vários dados *raster*, a direção da drenagem da área em estudo e, selecionado o ponto para ser o exutório da bacia, a delimitação é gerada a partir da ferramenta GRASS “*r.water.outlet*”. O resultado está mostrado na Figura 4.1.

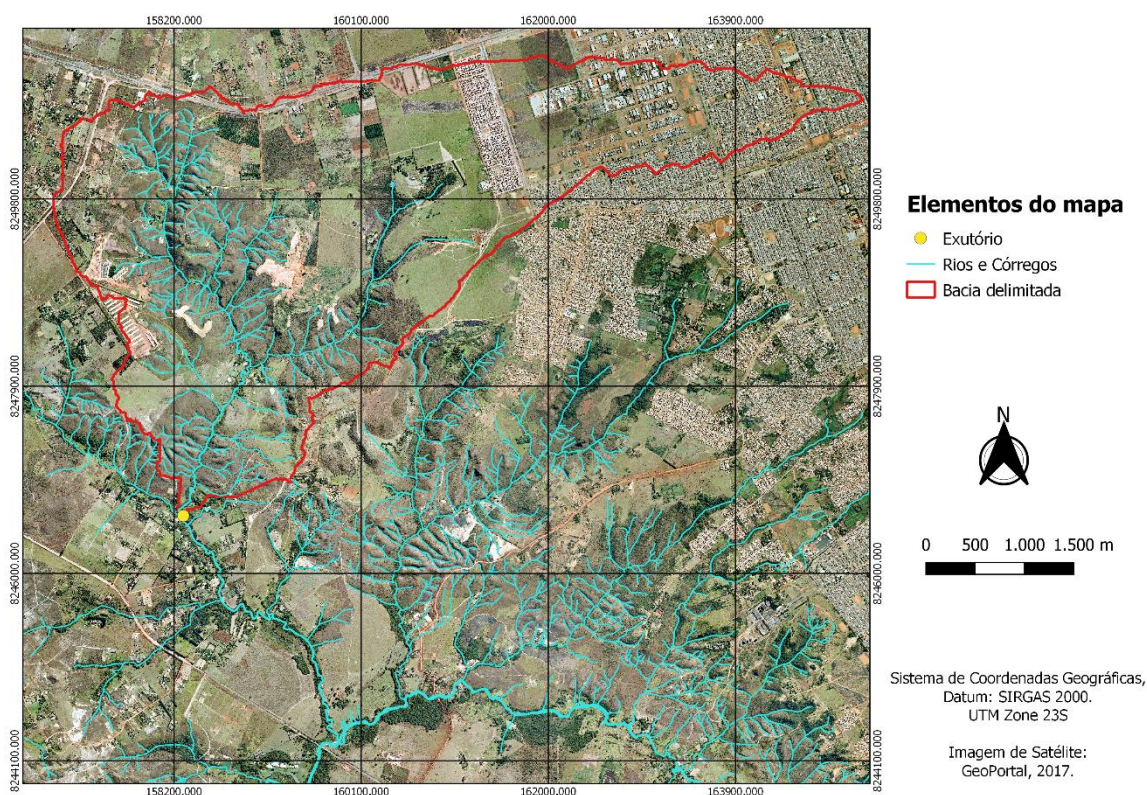


Figura 4.1 – Delimitação da microbacia hidrográfica.

A parte mais à direita da bacia inclui a urbanização de diversas quadras da Ceilândia, dentre elas as quadras QNR que foram utilizadas para delimitar o recorte da microbacia. Uma vez que o foco do estudo é o processo erosivo da área degradada por mineração, foi feita uma análise para recortar a bacia de forma que essa influência da erosão se desse somente na área rural. A análise incluiu verificar a urbanização dessas quadras e gerar um dado de declividade para a bacia.

As quadras QNR possuem infraestrutura de asfaltamento e sistema de drenagem urbana com bocas de lobo nas vias principais e secundárias, como verificado por imagens de satélite, de 2011 e 2014, do Google Earth. A declividade foi gerada, percentualmente, a partir do MDE e foi constatado que a área urbana está localizada numa região de declividade muito suave (até 3%), como visto na Figura 4.2. Partindo da hipótese que toda a água que escoar na região urbana da microbacia fica retida no sistema de drenagem, o recorte da bacia seguindo as vias das QNR's foi aceitável.

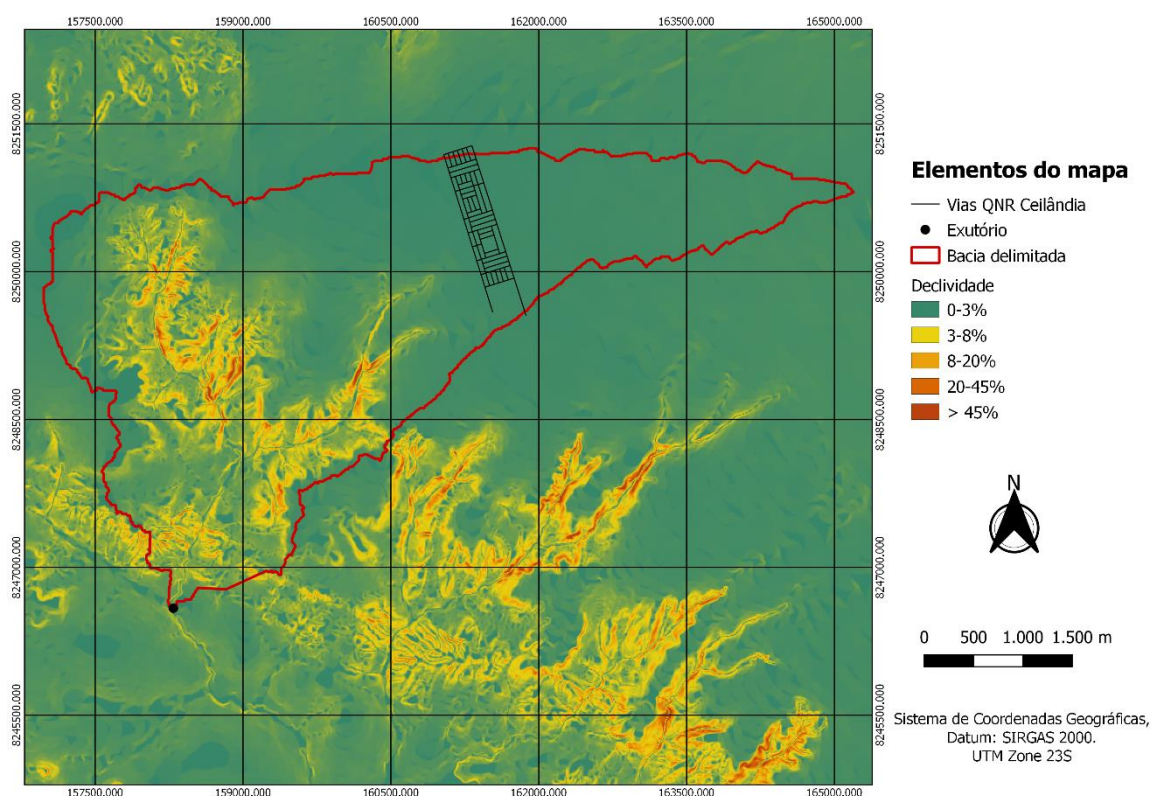


Figura 4.2 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica.

Conforme a Figura 4.2, também é possível observar um comportamento assimétrico na bacia. A parte esquerda contribui mais fortemente do que a parte direita no grau de declividade da bacia e, analisando essa característica isoladamente, é a parte que possui mais vertentes declivosas que podem levar os sedimentos erodidos para os cursos d'água.

4.2. CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA

A caracterização morfométrica foi feita para compreender o comportamento da microbacia hidrográfica antes e depois do recorte, comparando diferentes características

físicas tais como área da bacia, perímetro, coeficiente de compacidade, fator de forma, índice de circularidade e densidade de drenagem.

O coeficiente de compacidade (K_c) da Equação 4.1 é a relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de mesma área que a bacia (Cardoso *et al.*, 2006).

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equação 4.1})$$

Sendo:

- K_c – coeficiente de compacidade.
- P – perímetro da bacia, m.
- A – área de drenagem, m².

Quanto mais próximo o coeficiente de compacidade for de 1, mais a bacia hidrográfica se assemelha a um círculo, aumentando a potencialidade de picos de enchente na bacia, exemplificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Classes do coeficiente de compacidade K_c . Fonte: Palaretti (2006).

K_c	Representação
1 – 1,25	Bacia com alta propensão a grandes enchentes
1,25 – 1,50	Bacia com tendência mediana a grandes enchentes
> 1,50	Bacia não sujeita a grandes enchentes

O fator de forma (F) (Equação 4.2) é a razão entre a largura média da bacia (L_m) e o comprimento axial da bacia (L) (do exutório ao ponto mais longínquo da área) e pode ser reescrito como a razão da área da bacia pelo quadrado do comprimento axial.

$$F = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Equação 4.2})$$

Sendo:

- F – fator de forma.

- A – área de drenagem, m².
- L – comprimento do eixo da bacia, m.

Quanto menor o fator de forma (Tabela 4.2), mais alongada é a bacia e, portanto, se torna menos sujeita a picos de enchente e menor a possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo, simultaneamente, toda a sua extensão.

Tabela 4.2 – Classes do fator de forma F. Fonte: Palaretti (2006).

F	Representação
1,00 – 0,75	Sujeito a enchentes
0,75 – 0,50	Tendência média a enchentes
< 0,50	Não sujeito a enchentes

O índice de circularidade (IC) é resultado da relação entre a área da bacia e o quadrado do perímetro segundo a Equação 4.3, expressando a capacidade da bacia em gerar enchentes e, assim como Kc, quanto mais próximo à 1, a bacia se aproxima de uma forma circular e diminui sempre que a forma se torna alongada.

$$IC = 12,57 * \frac{A}{P^2} \quad \text{(Equação 4.3)}$$

Sendo:

- IC – índice de circularidade.
- A – área de drenagem, m².
- P – perímetro, m.

A densidade de drenagem (Dd) indica o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem da bacia. Expressa a razão entre o comprimento total dos cursos d'água (efêmeros, intermitentes ou perenes) de uma bacia e a sua área (Equação 4.4).

$$Dd = \frac{Lt}{A} \quad \text{(Equação 4.4)}$$

Sendo:

- Dd – densidade de drenagem, km/km².
- Lt – comprimento total de todos os canais, km.
- A – área de drenagem, km².

Tabela 4.3 – Classes da densidade de drenagem Dd. Fonte: Palaretti (2006).

Dd (km/km²)	Representação
< 0,5	Bacia com drenagem pobre
0,5 – 1,5	Bacia com drenagem regular
1,5 – 2,5	Bacia com drenagem boa
2,5 – 3,5	Bacia com drenagem muito boa
> 3,5	Bacia excepcionalmente bem drenada

Assim, os índices da microbacia do Córrego Veredas, Córrego das Corujas e Córrego Guariroba foram calculados levando em conta os dados da bacia recortada e da bacia original, conforme a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características morfométricas para a bacia recortada e para a bacia original.

Características físicas	Bacia recortada	Bacia original
Área de drenagem (km²)	13,007	16,878
Área de drenagem (ha)	1300,729	1687,786
Perímetro (km)	18,041	25,989
Lt (km)	69,287	69,287
L (km)	5,298	8,076
Kc	1,401	1,771
F	0,509	0,259
Ic	0,502	0,314
Dd (km/km²)	5,327	4,105

Os resultados obtidos indicam que a microbacia original possui baixa susceptibilidade a enchentes em condições pluviométricas normais, em virtude do

coeficiente de compacidade (K_c) possuir valor bem maior do que 1 e o fator de forma (F) exibir um valor baixo. A microbacia total tende a uma forma alongada. A densidade de drenagem (D_d) da microbacia é excepcionalmente alta, especialmente pela grande quantidade de pequenos cursos d'água que contribuem para os três córregos principais.

Devido ao recorte da bacia, K_c , F e IC tiveram seus valores aumentados de modo a indicar um comportamento mais propício a picos de enchentes. O recorte aproxima o formato da bacia a um círculo, contudo a análise trata de uma bacia rural com grande área para infiltração, o que pode minimizar os efeitos do aumento desses índices.

4.3. FATOR R

Foram coletados os dados mensais e anuais médios de onze estações pluviométricas da CAESB, foram calculados os seguintes valores para o fator R (Tabela 4.5) para cada estação climatológica dentro do período do ano 1995 a 2017.

Tabela 4.5 – Fator R de cada estação pluviométrica.

Nº	Código	Estação	Fator R
1	1547018	Jockey Club	9311.46
2	1548006	ETA Taguatinga	8874.03
3	1548010	ETE Riacho Fundo	9247.29
4	1548007	ETA Brazlândia	8938.91
5	1548034	ETE Melchior	9305.54
6	1548033	ETE Recanto das Emas	9736.62
7	1548008	Descoberto	8638.96
8	1548030	Macacos (Cidade Eclética)	9103.85
9	1648015	Areias (Fazenda São Bento)	9257.66

Nº	Código	Estação	Fator R
10	1547017	Santa Maria	8261.97
11	1548005	Gama ETE Alagado	9110.69

Os resultados do fator Erosividade da Chuva (R) para a microbacia variaram entre 8.836,8 e 9.130,7 $MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$. O valor médio estimado para o fator R foi 8999,6 $MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$ e o desvio padrão 61,58 $MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$.

Ao utilizar o método IDW (Ponderação pelo Inverso da Distância), as amostras de pontos foram calculadas durante a interpolação de acordo com a influência de um ponto relativo a outro e que declina com a distância em uma área de valores desconhecidos. A ponderação atribuída aos pontos definidos (estações pluviométricas) através do fator R controlou como a influência da interpolação ocorre à medida que a distância dos pontos conhecidos aumentou. O resultado da interpolação com os valores do fator R de cada estação pluviométrica para a microbacia está apresentado na Figura 4.3.

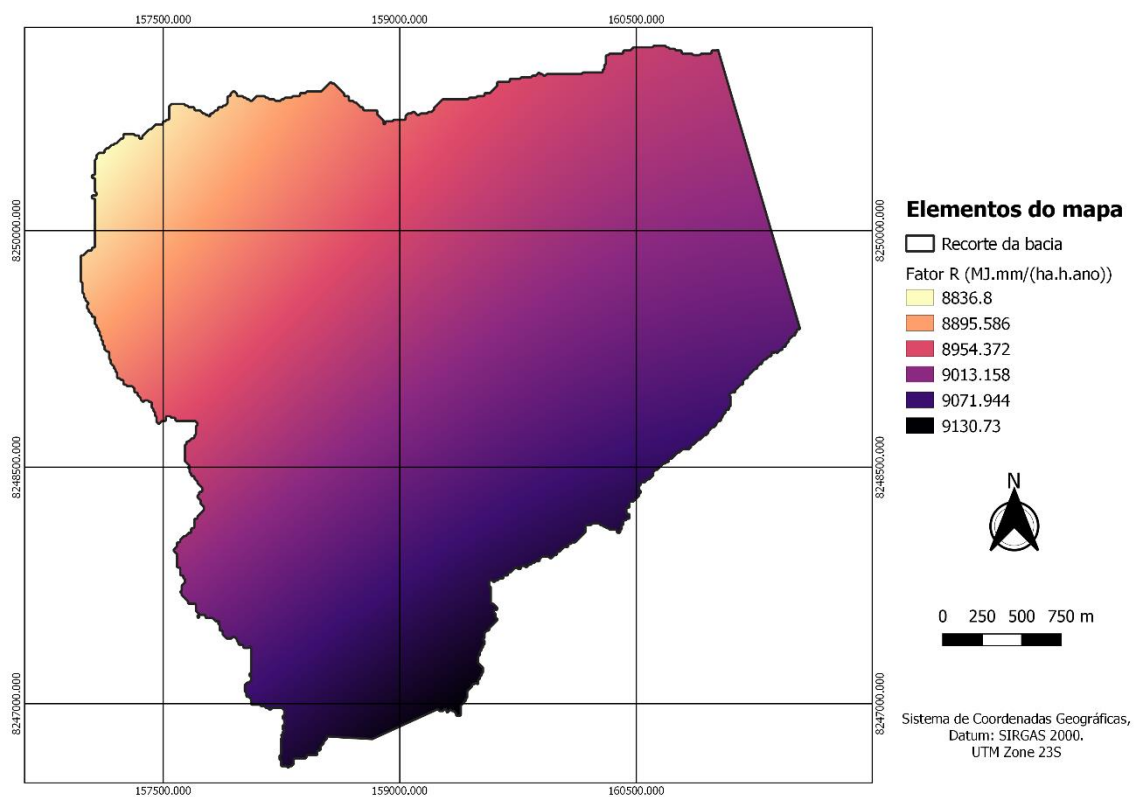


Figura 4.3 – Fator Erosividade R para a microbacia.

Para a comparação dos processos erosivos da microbacia para os anos de 1995 e 2017, assumiu-se que a pluviometria da região não se alterou dentro desse intervalo de tempo, portando o fator K foi considerado o mesmo para ambos os anos. Visto que os valores para R são calculados com base na precipitação média anual e mensal, a erosividade é maior no período mais chuvoso, que na área em estudo corresponde aos meses de outubro e abril.

A classificação dos valores de erosividade das chuvas seguiu a proposta de Santos (2008), apresentada na Tabela 4.6, com 5 classes adotadas: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta, usando como unidade $MJ.mm.ha^{-1}.ano^{-1}.h^{-1}$.

Tabela 4.6 – Classes de erosividade da chuva média anual propostas por Santos (2008).

Classes de Erosividade	Erosividade (MJ.mm/ha.h.ano)
Muito baixa	R < 2500
Baixa	2500 < R < 5000
Média	5000 < R < 7000
Alta	7000 < R < 9000
Muito alta	R > 9000

Conforme Santos (2008), a erosividade média das estações ETA Taguatinga, ETA Brazlândia, Descoberto e Santa Maria se encontram na classe de alta erosividade, enquanto as demais foram classificadas com erosividade muito alta. Por se tratar de uma região com clima bem marcado entre época de chuva e época seca, espera-se que o potencial erosivo seja mais expressivo na época chuvosa durante o ano.

4.4. FATOR K

Para a determinação do fator K, a delimitação dos tipos de solo da microbacia foi feito a partir do mapa da Embrapa de Solos (Anexo B). Os solos predominantes na área (cambissolo, latossolo vermelho e latossolo vermelho-amarelo) foram transformados em uma camada *shapefile* (Figura 4.4) de forma que fosse possível atribuir os valores do fator K, segundo Silva (2004). Por se tratar de um solo mais raso e mais arenoso, o cambissolo é o solo com a maior suscetibilidade à erosão e representa mais de 50% da área da microbacia (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Área em hectares e porcentagem dos tipos de solo.

Tipos de solo	Área (ha)	Área (%)	Fator k
Latossolo Vermelho	182,541	14,04	0,014
Latossolo Vermelho- Amarelo	367,631	28,27	0,032
Cambissolo	750,556	57,69	0,048

A classe latossolo vermelho (LV) ocupa aproximadamente 14% da área de estudo, latossolo vermelho-amarelo (LVA) ocupa aproximadamente 28% e o cambissolo (CX) ocupa cerca de 58% e a distribuição pode ser visualizada conforme a Figura 4.4.

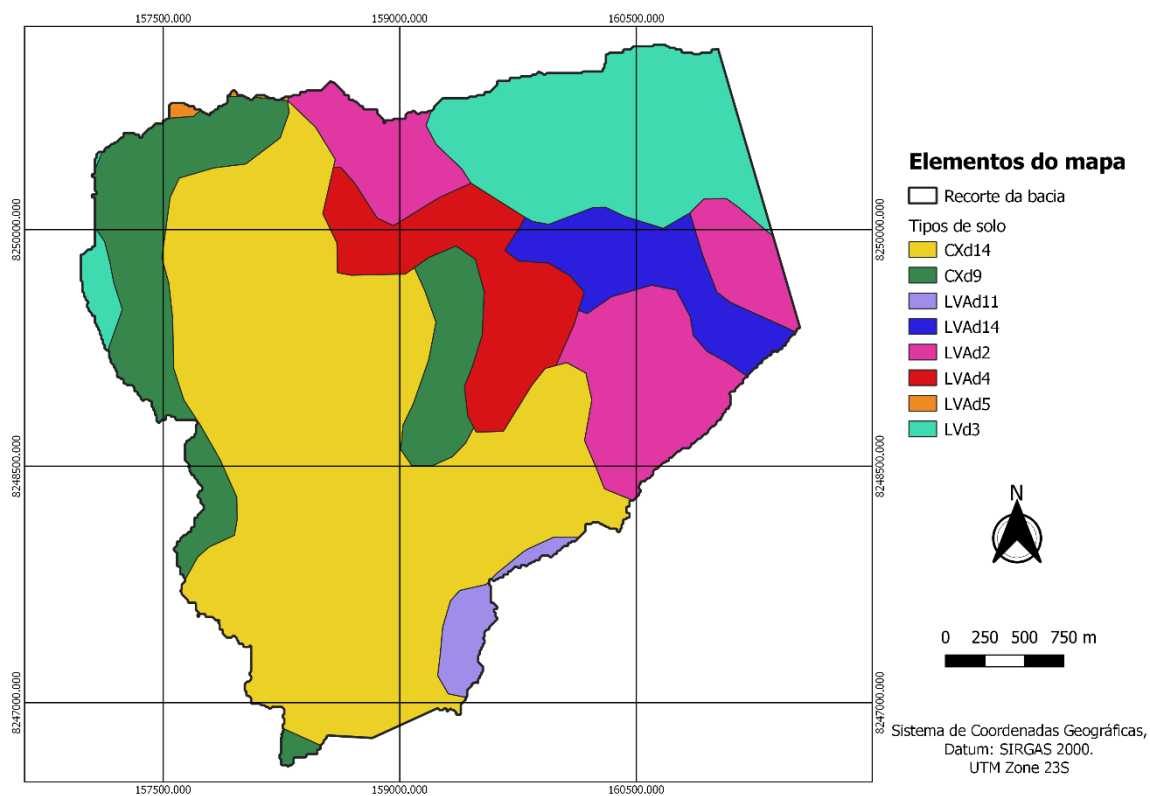


Figura 4.4 – Distribuição dos tipos de solo da microbacia.

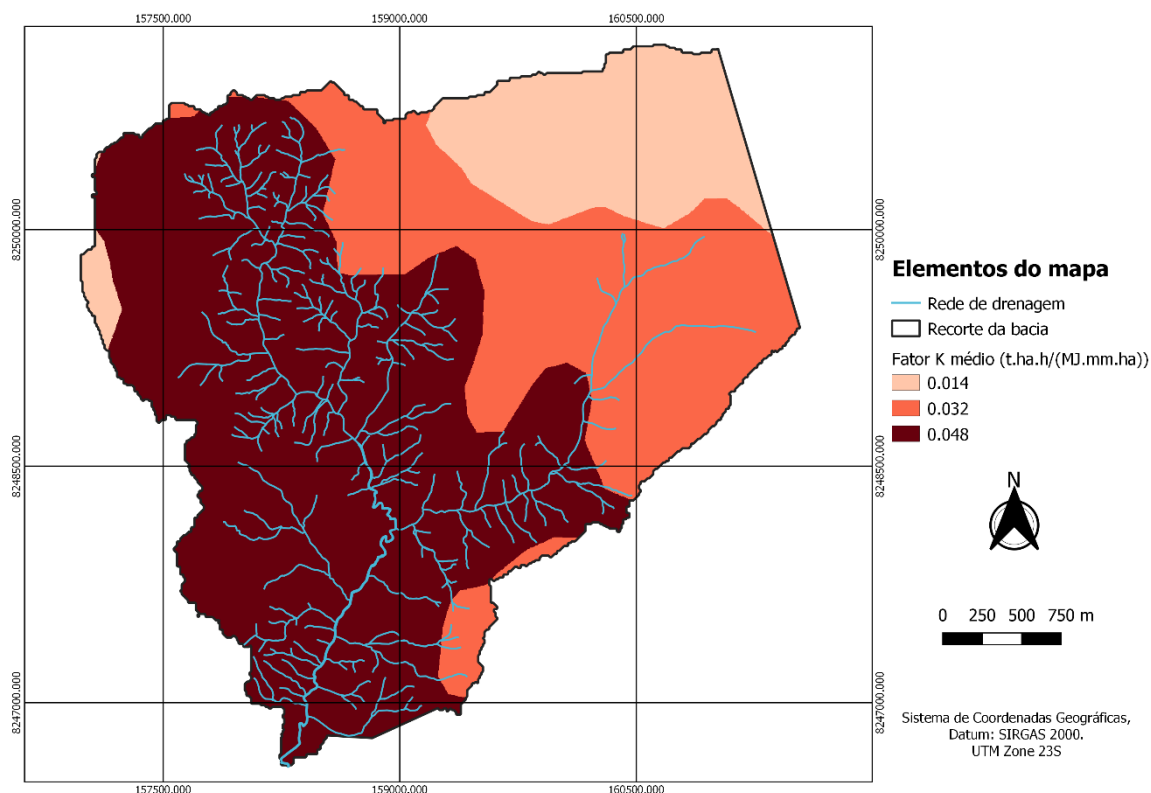


Figura 4.5 – Fator Erodibilidade K para a microbacia com rede de drenagem.

A comparação dos processos de erosão superficial da microbacia para os anos de 1995 e 2017 assumiu que não ocorreu nenhuma modificação nos tipos de solo da região dentro desse intervalo de tempo, portando o fator R foi considerado o mesmo para ambos os anos.

Importante salientar que as regiões onde se encontra latossolo vermelho, tipo de solo com o menor valor do fator K nessa microbacia, são justamente as regiões que possuem menor declividade, apresentando pouca suscetibilidade aos processos erosivos de maneira geral. Já a região que abrange a maior parte de cursos hídricos é composta por cambissolo, solo com a maior taxa de erodibilidade do estudo e mais suscetível a erosão.

Tabela 4.8 – Classes de erodibilidade propostas por Gomes (2012).

Classes de Erodibilidade	Erodibilidade (t.ha.h/ha.MJ.mm)
Baixa	$K < 0,0198$
Média	$0,0198 < K < 0,040$
Alta	$K > 0,040$

4.5. FATOR LS

A declividade do terreno e o comprimento de rampa determinam a velocidade de escoamento superficial, caracterizando o potencial de carregamento pela erosão em termos de tamanho e quantidade de material (Tomazi, 2005). Maiores inclinações das vertentes do terreno acarretam em processos erosivos mais intensos e aumento da possibilidade de escorregamento de terra.

De acordo com o Modelo de Elevação Digital (MDE) utilizado para a microbacia, a altitude variou entre 975m e 1176,45m, com valor médio de 1105.68m. A obtenção do produto final dos fatores L e S se deu por meio da ferramenta GRASS “*r.watershed*”, mesma ferramenta utilizada para o cálculo da direção da drenagem da microbacia. Os valores do fator LS variam entre 0,03 e 13,41. O valor médio estimado para o fator LS foi 0.46 e o desvio padrão 1.05. Observa-se na Figura 4.6 que os maiores valores para LS estão próximos à rede de drenagem, sobretudo nos cursos principais.

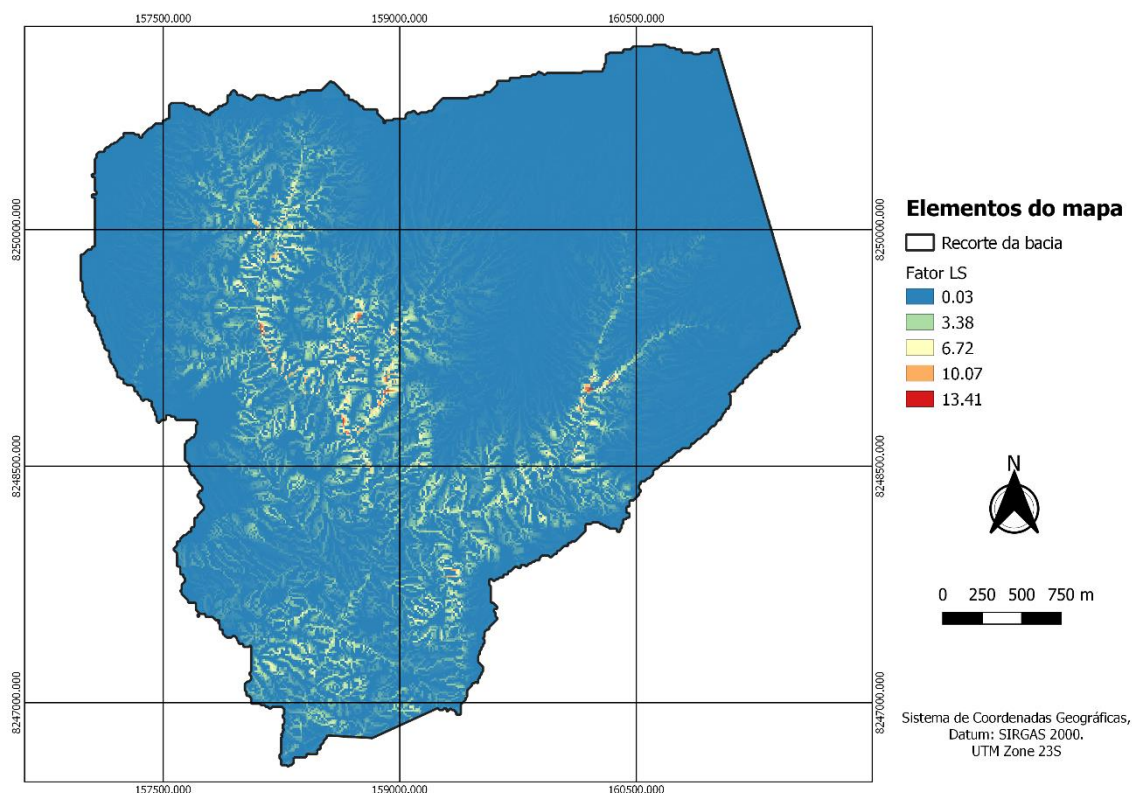


Figura 4.6 – Fator Comprimento de Rampa L e Declividade S para a microbacia.

Igualmente aos fatores R e K, a comparação dos processos erosivos da microbacia para os anos de 1995 e 2017 assumiu que a declividade e o comprimento de rampa não possuem modificação significativa dentro desse intervalo de tempo, portando o fator LS foi, também, considerado o mesmo para ambos os anos.

4.6. FATOR CP

Diferentemente dos fatores anteriores, o fator CP é alterado à medida que o uso e cobertura de uma região se transforma. No ano 1995, a microbacia não possuía a atividade minerária em questão, sendo que essa área era revestida por cerrado não modificado antropicamente. Já em 2017, a atividade minerária já havia se extinguido deixando a área degradada como passivo ambiental.

Por se tratar de uma bacia predominantemente rural, as práticas no manejo de solos fazem grande diferença no equilíbrio ambiental, visto que as modificações antropológicas estão, principalmente, associadas aos maiores valores encontrados para o fator CP na literatura. A classificação foi feita manualmente, no *software* QGIS 3.4.12, com auxílio do

plug-in Dzetsaka, que permite fazer uma classificação supervisionada semi-automática das imagens. As Figuras 4.7 e 4.8 caracterizam o uso e cobertura da microbacia para os anos 1995 e 2017, respectivamente.

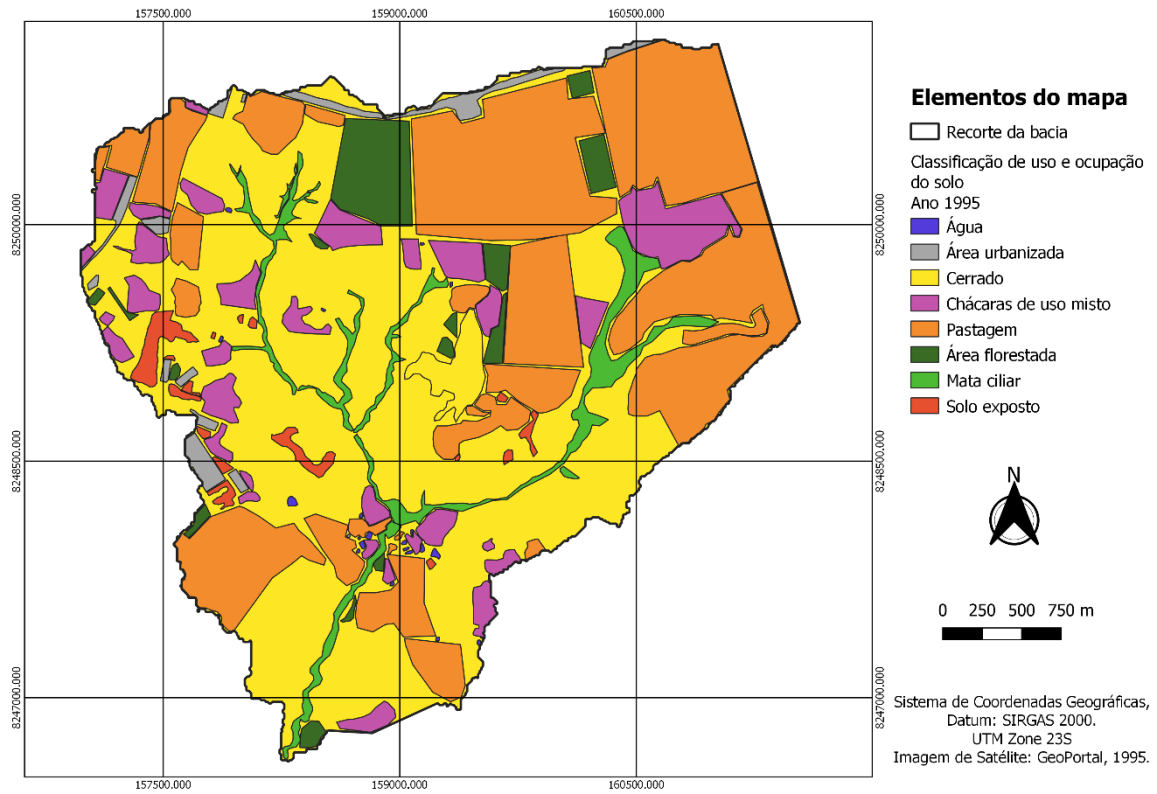


Figura 4.7 – Mapa de uso e cobertura do solo da microbacia no ano 1995.

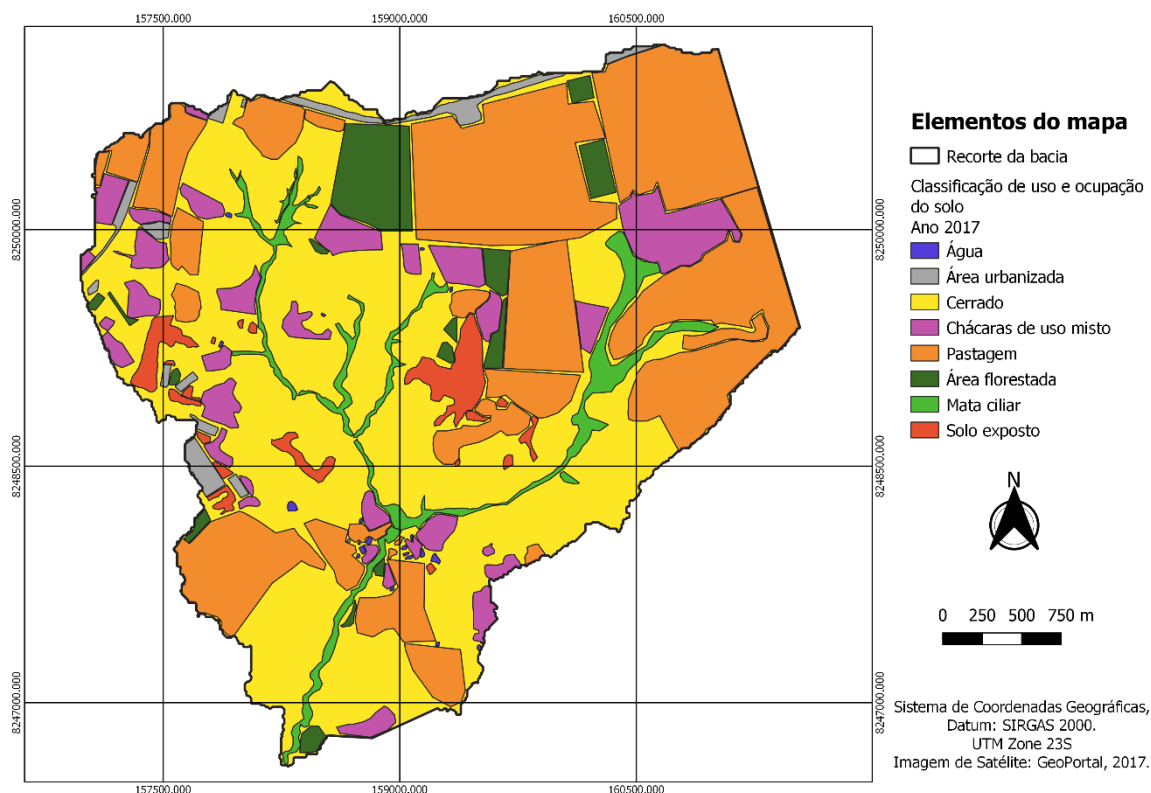


Figura 4.8 – Mapa de uso e cobertura do solo da microbacia no ano 2017.

Os valores do fator CP espacializados para toda a área da microbacia (Figuras 4.7 e 4.8) foram transformados na Tabela 4.9 para visualização das áreas atribuídas para cada uso do solo em 1995 e 2017.

Tabela 4.9 – Fator CP em hectares e porcentagem dos tipos de uso e cobertura para os anos 1995 e 2017.

Classes de uso do solo	Área (ha) -	Área (%) -	Área (ha)	Área (%)	Valores de cp
	1995	1995	- 2017	- 2017	
Solo exposto (áreas degradadas, mineração)	17,404	1,34	33,204	2,55	0,2500
Corpos d'água (represas, rios, lagos)	1,703	0,13	1,703	0,13	0,0000

Classes de uso do solo	Área (ha) - 1995	Área (%) - 1995	Área (ha) - 2017	Área (%) - 2017	Valores de cp
Mata de galeria (mata ciliar e de galeria)	50,984	3,92	50,984	3,92	0,0001
Área urbana (com e sem infraestrutura)	22,495	1,73	22,495	1,73	0,0001
Reflorestamento (nativas e eucalipto)	52,276	4,02	52,276	4,02	0,0001
Pastagem	454,04	34,90	454,04	34,90	0,0100
Cerrado (sentido amplo)	595,403	45,78	579,603	44,57	0,0007
Chácaras (chácaras de uso misto)	106,423	8,18	106,423	8,18	0,0100

Para este trabalho, foi considerado que as áreas de pastagem correspondem às áreas onde foi retirada a cobertura nativa de cerrado, de forma a ficarem só espécies gramíneas, modificação comum para áreas pertencentes e próximas a chácaras e imóveis rurais.

Os usos do solo predominantes (Tabela 4.9) na microbacia, de forma decrescente, são: cerrado (formações campestres, savânicas e florestais), pastagem e chácaras de uso misto. Como pode ser observado na Tabela 4.9, a principal modificação é a conversão de cerrado, de 45,78% para 44,57%, em área de solo exposto, de 1,34% para 2,55%, entre 1995 e 2017. Por se tratar de uma microbacia predominantemente rural, a área minerária representou um aumento de 15,8 hectares de área de solo exposto na bacia em estudo.

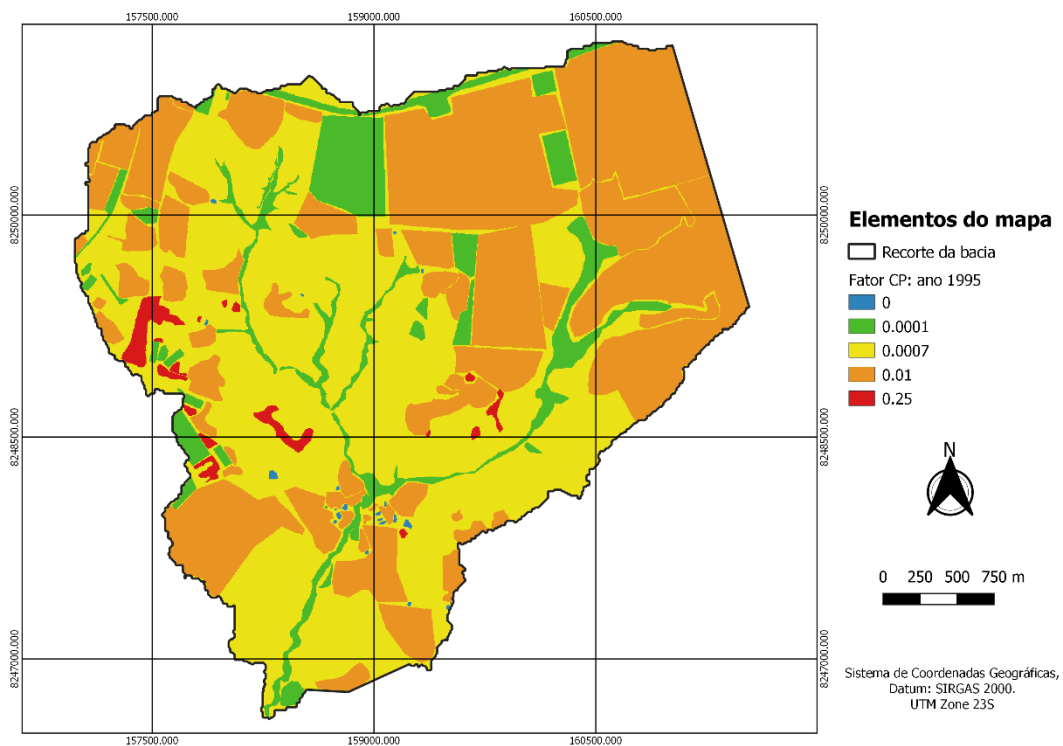


Figura 4.9 – Fator Uso e Manejo C e Práticas Conservacionistas P no ano 1995.

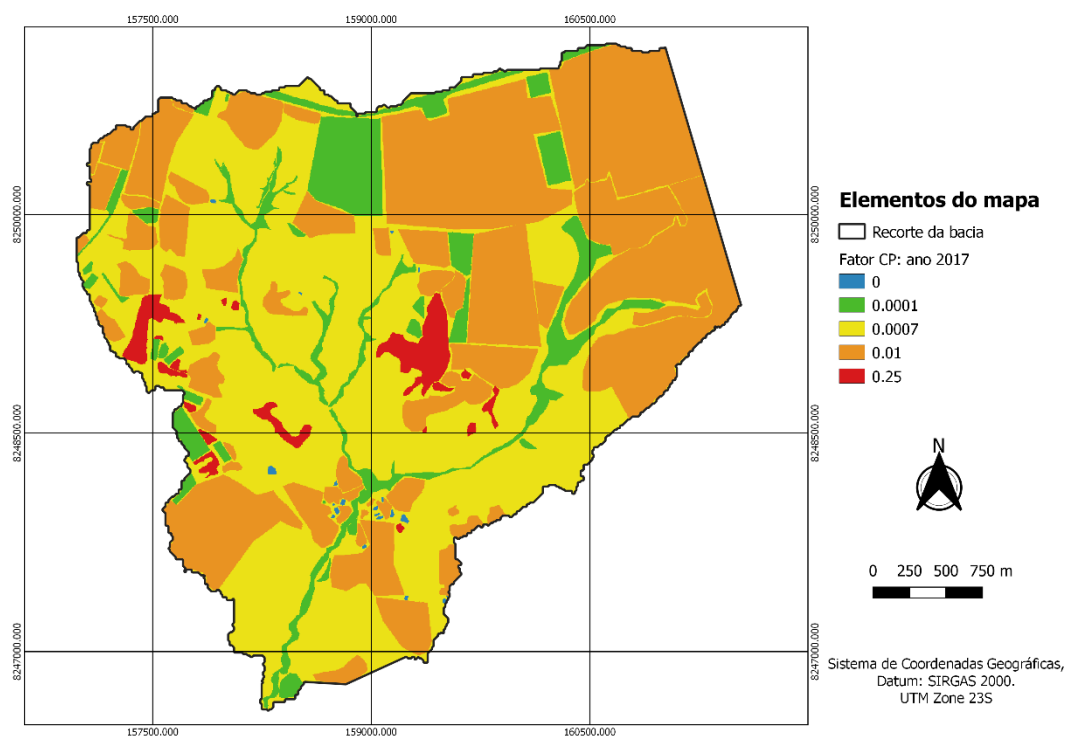


Figura 4.10 – Fator Uso e Manejo C e Práticas Conservacionistas P no ano 2017.

Nas Figuras 4.9 e 4.10, os maiores valores de CP foram atribuídos para as áreas de solo exposto (áreas degradadas), chácaras de uso misto e pastagem. Na maior parte da microbacia, o valor do fator CP foi de 0,0007 pelo predomínio de cerrado nativo.

4.7. CÁLCULO DA EUPS

Após a elaboração de todos os mapas para os fatores R, K, LS e CP, o cálculo da EUPS para estimativa da perda de solo por erosão laminar foi feito para os anos de 1995 e 2017. Os resultados foram descritos na Tabela 4.10 e as distribuições espaciais da estimativa de erosão na microbacia estão apresentadas nas Figuras 4.11 e 4.12, para os respectivos anos.

Tabela 4.10 – Classificação da EUPS para as classes de perda de solo (ton/ha.ano). Grau de erosão segundo FAO, UNEP e UNESCO apud Alonso et al. (1994).

Perda de solo (ton/ha.ano)	Grau erosivo	Área (ha) - 1995	Área (%) - 1995	Área (ha) - 2017	Área (%) - 2017
0 - 1	Baixo	1204,67	92,62	1188,88	91,40
1 - 10	Baixo	87,80	6,75	97,31	7,48
10 - 40	Moderado	5,89	0,45	10,29	0,79
40 - 70	Alto	1,08	0,08	2,66	0,20
70 - 90	Alto	0,54	0,04	0,73	0,06
90 - 110	Alto	0,26	0,02	0,29	0,02
110 - 130	Muito alto	0,06	0,01	0,09	0,01
> 130	Muito alto	0,43	0,03	0,47	0,04

Conforme a Tabela 4.10, para ambos os anos, a classe de erosão laminar de 0 a 1 ton/ha.ano representa a área majoritária da microbacia, como mais de 90% da região estudada. Este nível de erosão é considerado como baixo segundo a classificação sugerida

por Alonso et al. (1994). A classe de erosão de 1 a 10 ton/ha.ano ocupa a segunda maior área, também para ambos os anos e, ainda que represente uma classe de baixa erosividade, deve ser observado que sua influência na erosão laminar é significativa para grandes áreas e a perda de material superficial em uma bacia rural merece cuidados. Regiões com o predomínio de chácaras de uso misto e pastagem e predomínio de maiores valores para o fator LS corresponderam à classe de perda de solo moderada (0,45%) no ano 1995. Dentre as classes de alta erosão, pode-se destacar usos da terra com áreas de solo exposto correspondentes a 0,18% da bacia no ano 1995.

O cálculo da EUPS para os anos de 1995 e 2017, respectivamente, se encontra nas Figuras 4.11 e 4.12.

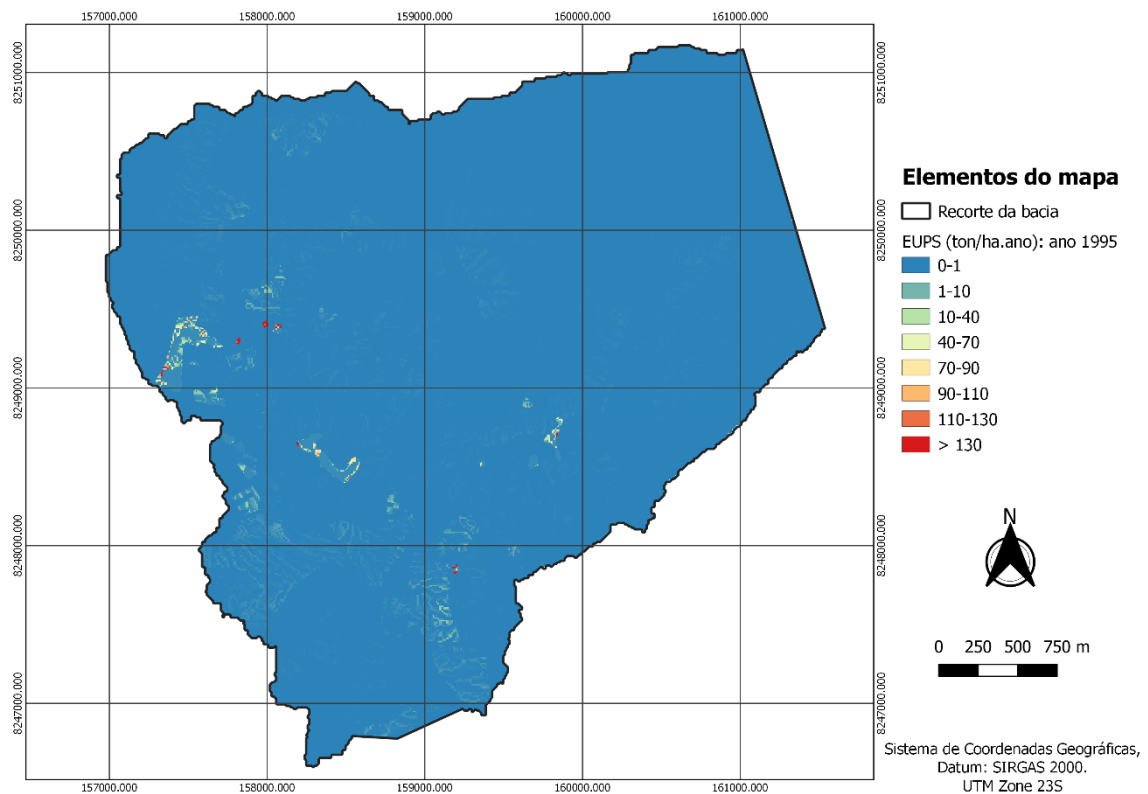


Figura 4.11 – Estimativa de erosão laminar pela EUPS para o ano 1995.

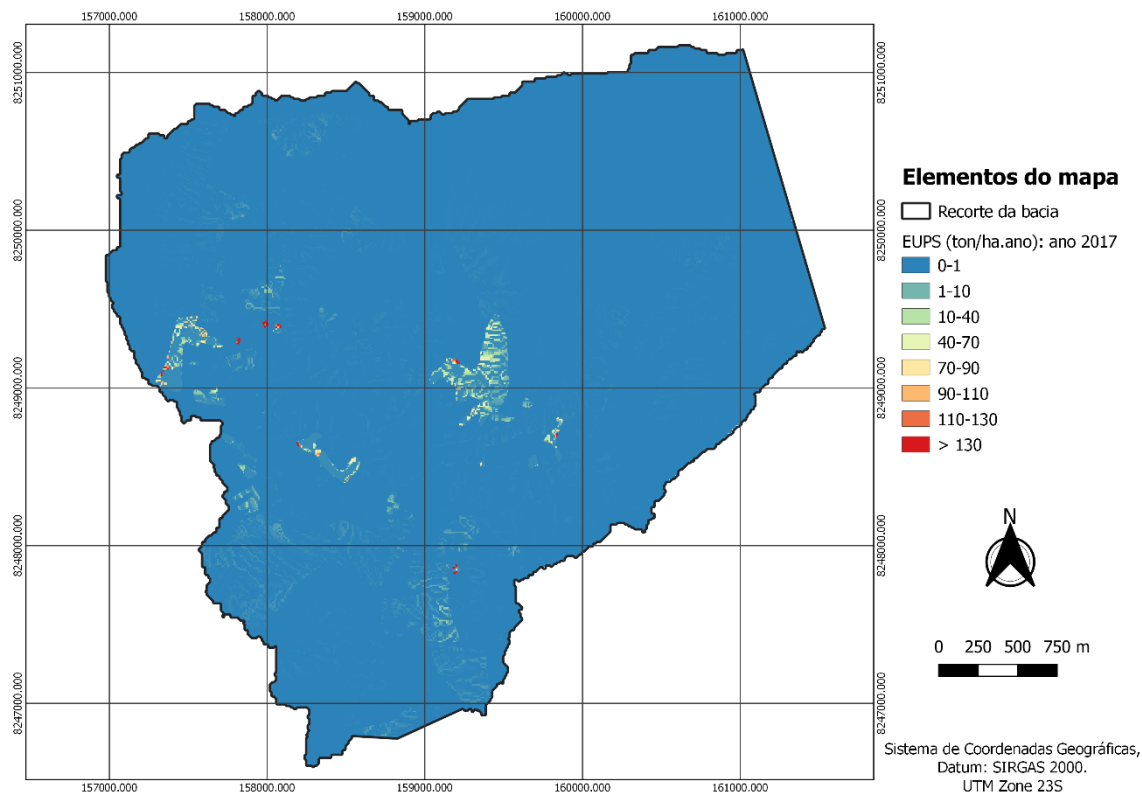


Figura 4.12 – Estimativa de erosão laminar pela EUPS para o ano 2017.

O mapeamento dos valores de erosividade da chuva (Fator R) encontrou uma média de $8999,6 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ($917,39 \text{ t} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$) para a microbacia em estudo. Segundo Santos (2008), esse valor é classificado em alta erosividade, muito expressivo, principalmente, no período chuvoso.

No fator LS, os valores mais significativos estão, justamente, próximos aos cursos hídricos, contribuindo para os riscos de assoreamento na bacia. Com o aumento do gradiente de declividade da vertente, aumenta também a velocidade e a erosividade resultante do escoamento superficial (Gomes, 2012). Assim, esse pode ser um fator importante no potencial erosivo da bacia estudada, devido ao carregamento de sedimentos da bacia e da área minerada para os córregos adjacentes.

Para a erodibilidade de solos, os maiores valores para o potencial de erosão estão localizados em áreas de cambissolos, local da área degradada por mineração. As áreas de latossolo possuem a maior parte das áreas de pastagens e chácaras de uso misto, provavelmente por estarem, majoritariamente, em áreas de relevo plano a suave.

Neste estudo, o manejo do solo e as práticas conservacionistas são os fatores que mais contribuem para a perda de solo. Na microbacia, os usos do solo que mais corroboram para a erosão são as áreas de pastagem, chácaras de uso misto e áreas de solo exposto. Os valores médios estimados para a EUPS nos anos 1995 e 2017 foram, respectivamente, 0.61 ton/ha.ano e 0.79 ton/ha.ano e os valores de desvio padrão foram 4.81 e 5.55.

É possível constatar pela Tabela 4.10 que, para a comparação entre os anos 1995 e 2017, a única classe de perda de solos que teve sua área diminuída foi a de 0 a 1 ton/ha.ano, sendo a diferença entre os anos praticamente igual ao tamanho da área minerada (15,79 ha). Com a supressão da vegetação nativa e implantação de uma área de mineração, é plausível que as classes de maiores taxas para a EUPS tiveram suas áreas aumentadas, em especial as classes de 1 a 10 ton/ha.ano, 10 a 40 ton/ha.ano e 40 a 70 ton/ha.ano.

Dentro desse cenário, a taxa de perda de solo por erosão laminar pode ter um incremento aproximado com variação entre 15 e 1106 toneladas de sedimentos por ano com a presença de uma área degradada por mineração. Com as estações bem marcadas de chuva e seca do Distrito Federal, pode-se esperar que os valores mais críticos para essa taxa ocorrem nos meses de chuva.

4.8. MEDIDAS DE REMEDIAÇÃO

Com o objetivo de recuperar a área degradada, algumas medidas de remediação poderiam evitar o aumento da erosão laminar na área minerada em estudo e, por conseguinte, minimizar os processos erosivos do solo na microbacia. Dentre várias medidas de mitigação desses processos, pode-se mencionar:

- Segundo a NBR 13030, a recuperação da área para usos futuros deve contar com: a estabilidade, o controle de erosão e drenagem, adequação paisagística e revegetação com predomínio de espécies nativas locais.
- Por se tratar de uma área degradada em cambissolo, solo com maior porcentagem de areia e silte e com pouca profundidade, é necessário restabelecer a fertilidade do solo com possível correção de acidez, correção por adubação orgânica e nutrientes para favorecer a regeneração de espécies do cerrado e redução das vertentes de drenagem por aplanamento do terreno.

- Otimizar o tempo de recuperação e recomposição da área com transferência de *topsoil*, camada de estéril fértil, para plantio de vegetação nativa. Visto que se trata de uma área em meio rural, medidas de manejo agrícola podem revegetar a área de modo eficiente, desde que observadas as práticas de conservação do solo.
- Estabelecer medidas de captação da água e monitoramento dos córregos perenes adjacentes à área degradada para análise periódica dos índices de qualidade da água, tais como parâmetros de turbidez, cor e vazão.
- Incentivar medidas de monitoramento ambiental em razão da grande quantidade de corpos d'água adjacentes à área degradada. Essa medida deve ser feita, preferencialmente, antes, durante e após o encerramento das atividades nas minas para evitar os riscos de assoreamento.

5. CONCLUSÕES

A microbacia em estudo possui a maior parte da extensão com áreas de baixo potencial de erosão laminar. Neste trabalho, estimou-se que houve um aumento de 0.61 ton/ha.ano para 0.79 ton/ha.ano na taxa média de perda de solo, taxa considerada baixa de acordo com as classes propostas por Alonso et al. (1994). As áreas com maiores valores de erosão laminar foram observadas em áreas com solo exposto, principalmente com a implantação de uma área minerada de 15,8 ha, chácaras de uso misto e pastagem.

Observou-se que a bacia possui um erosividade alta a muito alta que pode se tornar mais crítica nos períodos de chuva com média de $8999,6 \text{ MJ} \cdot \text{mm} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ ao ano. Como a região possui um relevo mais suave com latossolo, solo menos erodível, na extensão afastada dos córregos e um relevo mais íngreme com cambissolo, solo mais erodível, próximo aos cursos d'água, os fatores topográfico e pedológico se tornam bastante relevantes dentro da análise de suscetibilidade à erosão neste estudo.

Há uma extensa área coberta por cerrado, que possui baixo grau erosivo, e minimiza a erosão laminar na microbacia. Como o uso e ocupação do solo é o fator mais influente na alteração e aumento dos processos erosivos na bacia para o período de tempo analisado, a degradação do solo por ações antrópicas pode ser remediada com medidas de recuperação de curto a médio prazo.

Com o mapeamento de uso e cobertura para os anos de 1995 e 2017, observou-se que a supressão vegetal que deixa o solo exposto é um fator extremamente impactante na geração de sedimentos, aumentando, principalmente, as classes de perda de solo entre 1 a 70 toneladas de sedimentos por hectare anualmente. A transformação de cobertura de vegetação nativa para área de solo exposto acarreta em um potencial erosivo que cresce diretamente com o aumento de uma área minerada, fato que corrobora com a necessidade de monitoramento ambiental desde o início do empreendimento.

Atividades minerárias possuem um impacto considerável na exposição do solo, desmatamento e transporte de sedimentos, resultando em aumento significativo da erosão laminar e tendendo a um risco de assoreamento de corpos hídricos em suas proximidades. Esses empreendimentos precisam de técnicas de remediação e monitoramento adequados para que o impacto ambiental inerente seja minimizado e não ocorram situações similares à da área em estudo neste trabalho, onde não foram executadas as medidas de remediação

quanto a erosão laminar, tornando propício o avanço de processos erosivos como sulcos, ravinas ou voçorocas.

O levantamento de dados deste trabalho foi feito de forma totalmente remota e em função de falta de informações, recomenda-se para uma análise mais completa e trabalhos futuros a coleta de dados ambientais no local de estudo, de modo a incorporar a análise de suscetibilidade do solo a processos erosivos mais severos, utilizar modelos matemáticos que calculem a erosão da área com a presença de ravinas e voçorocas, visto que a EUPS é um modelo para erosão laminar, e consolidar a proposta para medidas de remediação e recuperação da área degradada com uma avaliação mais minuciosa do grau de degradação do ecossistema afetado.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, L. A., Araújo, G. H., Almeida, J. R.; Soares, P. S. e Possa, M. V. (2008). “Análise e Avaliação de Risco Ambiental como Instrumento de Gestão em Instalações de Mineração”. In: Carvão Brasileiro: Tecnologia e Meio Ambiental, Rio de Janeiro, Brasil, 213-235.
- Almeida, S. L. M. e Luz, A. B. (2009). *Manual de Agregados para a Construção Civil*. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM/MCT. Rio de Janeiro, Brasil, 432p.
- Alonso, J. A. et al. (1994). *Métodos de estimación de la erosión hídrica*. Madrid, Espanha, 152p.
- Araújo, G.H.S., Almeida, J.R. e Guerra, A.J.T. (2005). *Gestão ambiental de áreas degradadas*. Ed. Bertrand Brasil Ltda. São Cristóvão, Rio de Janeiro, 320p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma ABNT – NBR 13030:1999 (1999). *Elaboração e apresentação de projeto de reabilitação de áreas degradadas por mineração*. Brasil.
- Balasubramanian, A. (2017). *Methods of Controlling Soil Erosion*. Centro de Estudos Avançados em Ciência da Terra. Universidade de Mysore, Mysore, Estados Unidos.
- Bertoni, J. e Lombardi Neto, F. (2012). *Conservação do Solo*. 8a ed. São Paulo, Brasil, 392p.
- BRASIL (2012). Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Institui o Código Florestal. Seção 1. Diário Oficial da União, Brasília, Distrito Federal.
- BRASÍLIA (2009). Lei Complementar nº 803, de 25 de abril de 2009. Aprova o Plano Diretor de Ordenamento Territorial do Distrito Federal – PDOT. Diário Oficial do Distrito Federal, Brasília, Distrito Federal.
- BRASÍLIA (2019). Decreto nº 39.948, de 15 de julho de 2019. Institui o Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal. Diário Oficial do Distrito Federal, Brasília, Distrito Federal.
- Cardoso, C. A., Dias, H. C. T., Soares, C. P. B.; Martins, S. V. (2006). Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, Rio de Janeiro, *Revista Árvore*, 30(2), 241-248.

- Carneiro, P. J.R. (1999). Mapeamento Geotécnico e Caracterização dos Materiais Naturais de Construção do Distrito Federal: Uma Base de Dados para o Planejamento e Gestão, Universidade de Brasília. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 209p.
- Camapum de Carvalho, J., Sales, M, M, De Souza, N. M e Melo, M. T. S. (2006). *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil, 464p.
- Corrêa, R.S. (1998a). “Degradação e recuperação de áreas degradadas no Distrito Federal”. In: Corrêa, R.S. e Melo Filho, B. *Ed. Paralelo 15*, Coleção Régio Montano Campestris, Brasília, Brasil, 13-19.
- Corrêa, R.S. (1998b). Manejo de substratos e de áreas escavadas. “Ecologia e recuperação de áreas degradadas no Cerrado”. In: Corrêa, R.S. e Melo Filho, B. *Ed. Paralelo 15*, Coleção Régio Montano Campestris, Brasília, Brasil, 117-138.
- Corrêa, R.S. e Baptista, G.M.M. (2004). “Mineração e áreas degradadas no Cerrado”. *Universa*. Brasília, Brasil, 9-22.
- Corrêa, R.S. (2007). *Recuperação de áreas degradadas por mineração no Cerrado: Manual para revegetação*. Brasília, Brasil, 173p.
- Desmet, P. J. J. e Govers, G. (1996). “A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units”. *Journal of Soil and Water Conservation*, 51(5), 427-433.
- EMBRAPA. (2004). *Evolução Geomorfológica do Distrito Federal*. Planaltina, DF, Brasil, 57p.
- EMBRAPA. (2004). *Mapa pedológico Digital – SIG atualizado do Distrito Federal Escala 1:100.000 e uma síntese de texto explicativo*. Planaltina, DF, Brasil, 31p.
- EMBRAPA. (1978). *Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal*. Rio de Janeiro, Brasil, 455 p.
- FAO; ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura e Painel Técnico Intergovernamental em Solos, Roma, Itália, 650p.

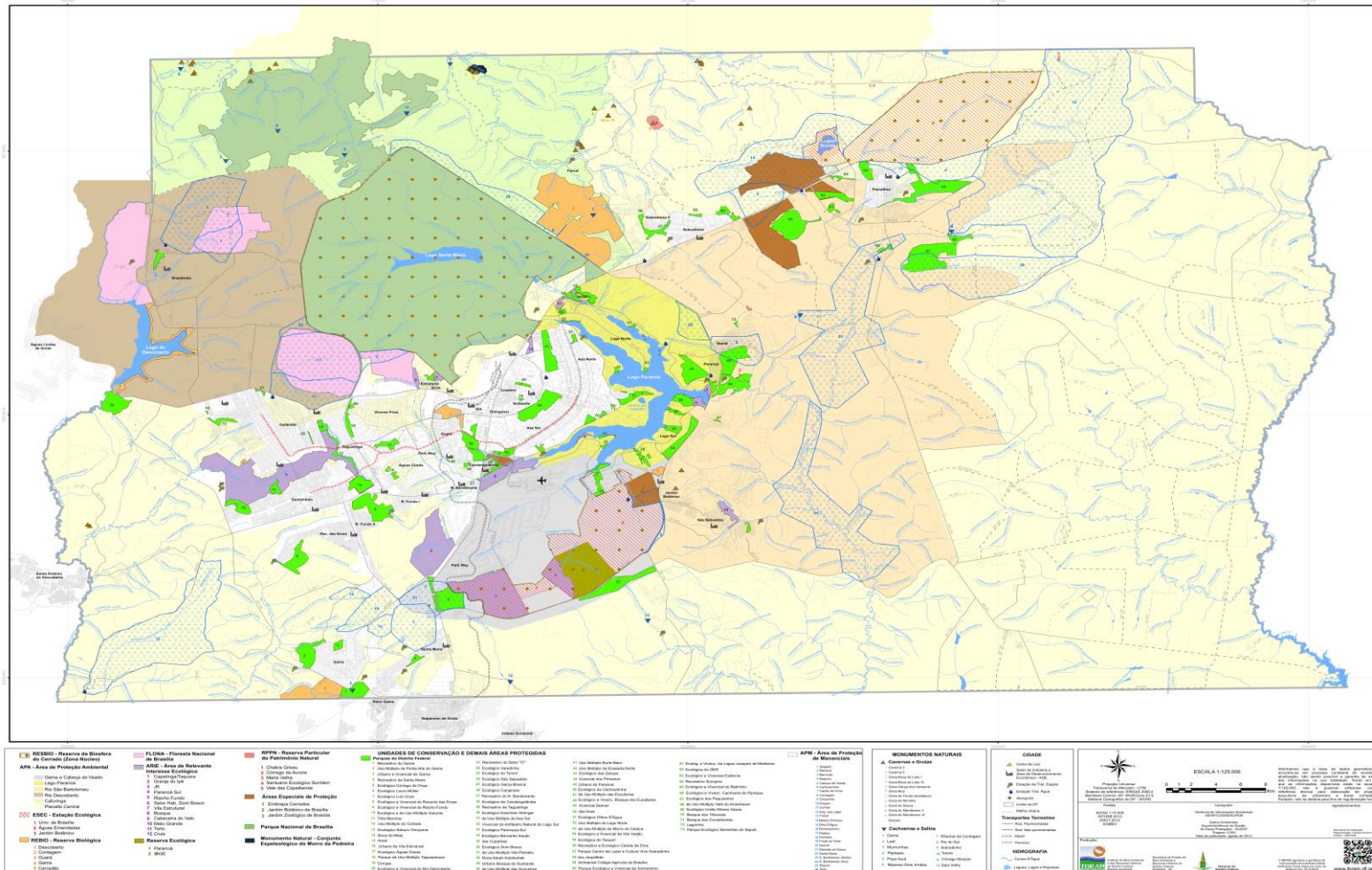
- Freire, A. J., Lage, G. B. e Christófaró, L. C. (2013). “Comparação entre parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas gerados por dados SRTM e ASTER GDEM: estudo de caso para bacias do Vale do Jequitinhonha-MG”. *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR*. 5443-5450, Foz do Iguaçu, Brasil.
- Gomes, L. L. (2012). Avaliação Espacial da Perda de Solo por Erosão pela Equação Universal de Perda do Solo (EUPS) – Pilha de Estéril Sul – Carajás/PA. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Núcleo de Geotécnica, Minas Gerais, Ouro Preto, MG, 192p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. (2004). *Vocabulário Básico de Recursos Naturais e Meio Ambiente / Basic Vocabulary of Natural Resources and Environment*. Rio de Janeiro, Brasil, 332p.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. (2013). *O setor de mineração no Brasil: fortalecimento institucional para o desenvolvimento sustentável*. Brasil, 116p.
- INSTITUTO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS DO DISTRITO FEDERAL BRASÍLIA AMBIENTAL. (2014). Mapa Ambiental do Distrito Federal. Brasília, DF.
- Koppe, J. C. e Costa, J. F. C. L. (2002). “Mineração. In: Meio Ambiente e Carvão: Impactos da Exploração e Utilização”. FINEP / CAPES / PADCT / GTM / PUCRS / UFSC / FEPAM, Porto Alegre, 15-27.
- Lima, M. C. (1999). *Contribuição ao estudo do processo evolutivo de boçorocas na área urbana de Manaus*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150p.
- Lombardi Neto, F. e Moldenhauer, W. C. (1992). “Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com as perdas de solo em Campinas (SP)”. *Bragantia*, 51(2), 189–196.
- Macedo, A. B e Bordignon. (1985). A mineração de areia na Região Metropolitana de São Paulo: aspectos econômicos, geológicos e ambientais. *Anais do Simpósios Regional de Geologia*, Vol. 1, 79-89. Brasil.
- Magalhães Filho et al. (2014). “Integrando SIG e USLE para mapeamento da perda de solo em área de proteção ambiental”. *Revista Agrarian*, 7(26), 552-559.

- Mannigel, A. R. et al. (2008). “Fator erodibilidade e tolerância de perda dos solos do Estado de São Paulo”. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 24(0), 1335–1340.
- Martín Duque, J. F., Zapico, I., Oyarzun, R., García, J. A. L. e Cubas, P. (2015). “A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain”. *Elsevier*, 239, 1-16.
- Minella, J. P. G., Merten, G. H. e Ruhoff, A. L. (2010). “Use of spatial representation to calculate the topographic factor in the revised universal soil loss equation in watersheds”. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(4), 1455–1462.
- Moreira, M. A. (2001). Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, Brasil, 246p.
- Mouri, G., Takizawa, S. e Oki, T. (2011). “Spatial and temporal variation in nutrient parameters in stream water in a rural-urban catchment, Shikoku, Japan: Effects of land cover and human impact”. *Journal of Environmental Management*. 92(7), 1837-1848.
- Palaretti, L. F. (2006). Apostila: Manejo de Bacias Hidrográficas. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 1-11.
- Rezende, M. M. (2017). *Análise e subsídio ao ordenamento territorial da mineração de agregados para a construção civil na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno*. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, Brasília, DF, 444p.
- Rivas, T. (2006). Erosion Control Treatment Selection Guide. USDA Forest Service Arapaho and Roosevelt National Forests and Pawnee National Grasslands. Estados Unidos. 64p.
- Rodrigues, F. M., Pissarra, T. C. T. e Campus, S. (2008) “Caracterização morfométrica da microbacia hidrográfica do córrego da Fazenda Glória, Município de Taquaritinga, SP”. *Irriga, Botucatu*, 13(3), 310-322.
- Santos, J.A.G. (2017). Recuperação e reabilitação de áreas degradadas pela mineração. Cruz das Almas, BA: UFRB, 44p.

- Santos, C.N. (2008). *El Niño, La Niña e a erosividade das chuvas no Estado do Rio Grande do Sul*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pelotas, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Pelotas, RS, 138p.
- SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE. (2016). Mapa Hidrográfico do Distrito Federal. Brasília, DF.
- Silva, V. C. (2004). Estimativa da Erosão Atual da Bacia do Rio Paracatu (MG / GO / DF). Parte da Tese de Doutorado, Universidade de Brasília, Programa de Pós-Graduação em Geologia. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 34(3), 147-159.
- Soares, M. R. G. de J. e Souza, J. L. M. (2012). “Análise morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno em São José dos Pinhais (PR)”. *Revista Geografia (Londrina)*, 21(1), 19-36.
- Stein, D.P., Donzelli, P., Gimenez, A.F., Ponçano, W.L. e Lombardi Neto, F. (1987). “Potencial de erosão laminar natural e antrópica na bacia do Peixe-Paranapanema”. *Anais do Simpósio Nacional de Controle de Erosão*, Vol. 4, 105-135, Marília, Brasil.
- Tomazoni, J. C. e Guimarães, E. “Sistematização dos Fatores da EUPS em SIG para Quantificação da Erosão Laminar na Bacia do Rio Jirau”. *Revista Brasileira de Cartografia*, 57(3), 235-244.
- Vargas, C. G. (1998). *A disposição de resíduos sólidos em área degradada por rejeitos da mineração de carvão: Análise do aterro controlado de Forquilha - SC*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Geociências, Florianópolis, SC, 139p.
- Wischemier, W. H. e Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses: a guide planning. Agriculture Handbook. Washington, DC, USDA, 58 p.

ANEXO A

MAPA AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - ANO 2014



ANEXO C

MAPA HIDROGRÁFICO DO DISTRITO FEDERAL - 2016

