

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

ÍCARO ALVES LOBO

**PERDA DE SOLO POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL: UMA ABORDAGEM
RETROSPECTIVA PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA NA REGIÃO
METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA**

VITÓRIA

2022

ÍCARO ALVES LOBO

**PERDA DE SOLO POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL: UMA ABORDAGEM
RETROSPECTIVA PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA NA REGIÃO
METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia na área de Dinâmica dos Territórios e da Natureza.

Orientador: Prof. Dr. Eberval Marchioro

VITÓRIA

2022

ÍCARO ALVES LOBO

**PERDA DE SOLO POR ESCOAMENTO SUPERFICIAL: UMA ABORDAGEM
RETROSPECTIVA PARA UMA BACIA HIDROGRÁFICA NA REGIÃO
METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Geografia, na área de Dinâmica dos Territórios e da Natureza.

Aprovado em ____ de _____ de _____.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Diogo Costa Buarque
Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Luiza Leonardi Bricalli
Departamento de Geografia
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Eberval Marchioro (Orientador)
Programa de Pós-Graduação em Geografia
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sabedoria, graça, misericórdia e salvação.

À minha família, por sempre acreditar em mim, me apoiar incondicionalmente e me amar de maneira imensurável. Sou muito grato a meus pais, Leonardo e Teresa e minhas irmãs, Érica e Mariana.

Aos meus amigos, tanto os de perto, como os de longe, que foram muito importantes para que eu não desistisse dos meus sonhos e tornaram mais leves os momentos de dificuldade.

À minha namorada, Karla Nascimento Cruz, que foi a pessoa que mais acreditou em mim ao longo do processo de escrita e me estimula todos os dias a ser um ser humano cada vez melhor. Eu te amo muito!

Aos membros do LAMOSA e todos os voluntários que estiveram envolvidos nos trabalhos de campo, em especial Júlia Frederica Effgen e Alanderson Gomes de Souza, que me ajudaram sobremaneira desde o primeiro dia que ingressei nesse laboratório. Sem vocês, não existiria essa dissertação.

A meu orientador, Dr. Eberval Marchioro, que demonstrou uma capacidade didática e paciência ímpares, além de empatia e compreensão inigualáveis. Sua presença no PPGG enriquece o departamento!

Aos membros do Laboratório de Geografia Física e todos que me ajudaram nas análises de amostras, em especial o Dr. Pablo de Azevedo Rocha, com quem dividi incontáveis dias e se tornou um dos meus grandes amigos. Espero poder retribuir toda sua ajuda no futuro.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), por financiar meus estudos e essa pesquisa.

A todos que de alguma maneira, direta ou indiretamente, contribuíram para o desenvolvimento desse projeto.

“A wise man does not burn his bridges until
he first knows he can part the waters.”

Norman Wilson

RESUMO

A erosão dos solos é um problema que vem afetado sobremaneira a humanidade e impacta diretamente a produtividade agrícola, os recursos hídricos e a configuração dos relevos. Para prever e evitar as consequências catastróficas proporcionadas pelas perdas dos solos, diversos modelos matemáticos foram desenvolvidos, visando estimar as tendências futuras do comportamento erosivo em uma determinada área a partir de parâmetros topográficos, climáticos e de uso da terra. Dentre esses modelos, destaca-se a Equação Universal da Perda de Solos (USLE ou EUPS), desenvolvida por Wischmeier e Smith em 1978, a partir da observação de parcelas experimentais nos Estados Unidos, e que, por ser facilmente replicável e demandar uma base de dados relativamente simples, apresenta grande aceitação como método de medição da perda anual de solos por erosão hídrica em diversas partes do mundo, em especial após o advento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os parâmetros para o cálculo dessa equação são a erosividade das chuvas (R), a erodibilidade dos solos (K), o comprimento de rampa (L), o gradiente de inclinação do declive (S), o uso e manejo do solo (C) e as práticas conservacionistas (P), que quando multiplicados resultam na quantidade total de solo perdido (A). Neste estudo, aplicou-se a EUPS para a área da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, situada no estado do Espírito Santo, visando a identificação das localidades mais propícias dessa região a sofrerem os efeitos da erosão hídrica, além de se fazer uma abordagem retrospectiva da evolução do uso e cobertura da terra nessa região e seus impactos no efeito erosivo para a bacia hidrográfica. Além disso, comparou-se a obtenção do fator de erodibilidade para os solos dispostos em trabalhos prévios com o método indireto de Sharpley e Williams (1990) para amostras coletadas ao longo de 39 pontos, visando identificar se essa metodologia para obtenção da erodibilidade pautada apenas na granulometria dos solos e em seu teor de matéria orgânica é adequada para a área de estudo, sem a utilização do Nomograma de Wischmeier e Smith.

Palavras-chave: Erosão hídrica – Modelagem – Erodibilidade

ABSTRACT

Soil erosion is a problem which affects mankind harshly and directly impacts the agricultural production, the hydric resources and topographical relief's configuration. Several mathematic models were developed to forecast and avoid the catastrophic consequences caused by soil loss, aiming to estimate future trends regarding the erosive behavior upon a determined area based on topographic, climatic and land usage and cover parameters. Among these models, one stand outs: The Universal Soil Loss Equation, developed by Wischmeier and Smith in 1978, based on experimental plots observation in the United States and, for being easily replicable and requiring a pretty simple database, is widely accepted as a method of yearly soil loss through hydric erosion estimation in several countries, especially after the rising and wide adoption of Geographic Information Systems (GIS). The parameters for calculating this equation are the rainfall erosivity (R), soil erodibility (K), the slope length (L), slope gradient (S), cropping management factor(C) and the erosion control practice factor (P). When these factors are multiplied, they result in the total of yearly soil loss (A). In this study, the USLE was applied for the entire area of Duas Bocas Watershed, located in the state of Espírito Santo, Brazil, with the objective of identifying the frailest regions to be affected by the hydric erosion, and also, to retrospectively analyze the evolution of the land coverage and usage in this watershed since 1970 and its impacts on soil losses. Moreover, some comparisons were made for the soil's erodibility factor between the ones registered in previous works with samples collected in situ throughout 39 points using the indirect method proposed by Sharpley and Williams (1990), seeking to check out if this method was adequate for obtaining the soil erodibility on the study area, based exclusively in variables like soil granulometry and percentage of organic carbon in the soil, without texture and the usage of Wischmeier and Smith's Nomograph.

Keywords: Hydric erosion – Geographic modeling – Erodibility

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evidências de erosão hídrica provocada por sobrepastoreio, com resquício de partículas de solo de maiores dimensões em La Ligua, Chile.	6
Figura 2: Processo de erosão por salpicamento, desagregação de frações de solo e preenchimento de microporos entre partículas	8
Figura 3: Intensidade de chuva, taxa de escoamento superficial e capacidade de infiltração para uma chuva artificial de intensidade constante em parcela experimental	9
Figura 4: Componentes da interceptação: P é precipitação; ET é evapotranspiração; AC é armazenamento nas copas; AT é atravessamento nas copas e FT é fluxo de troncos	11
Figura 5: Nomograma de Wischmeier de erodibilidade do solo	22
Figura 6: Representação vetorial (a) e matricial (b) de informações geográficas.....	31
Figura 7: Localização da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas entre os municípios de Cariacica, Santa Leopoldina e Viana, Espírito Santo, Brasil.	34
Figura 8: Distribuição média anual (1983-2013) das chuvas na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas	37
Figura 9: Distribuição média mensal da precipitação para o período entre 1983-2013 na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas	38
Figura 10: Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas	40
Figura 11: Mapa de classes de solos da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas.....	43
Figura 12: Hidrografia da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas	45
Figura 13: Hidrografia da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas	48
Figura 14: Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas (ES).....	49
Figura 15: Trincheira aberta para coleta de amostra (E) e coleta de solos na BHRDB (D)	55
Figura 16: Amostras coletadas em campo e almofariz de cerâmica utilizado para destorroar o solo	56
Figura 17: Amostras de solos após combustão (acima) e mufla utilizada para a queima do carbono (abaixo)	57

Figura 18: Etapa de pesagem (E) e processo de agitação lenta de amostra para granulometria em Agitador de Wagner (D).....	58
Figura 19: Cultura de Banana e Café na BHRDB	62
Figura 20: Esquema ilustrativo do processo de aplicação da EUPS a partir Álgebra de Mapas para obtenção da distribuição espacializada da perda de solos.....	65
Figura 21: Mapa de Erosividade das chuvas para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas	68
Figura 22: Mapa de Erodibilidade dos solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas	73
Figura 23: Mapa do Fator Topográfico para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas	75
Figura 24: Mapa do Potencial Natural de Erosão para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas	77
Figura 25: Porcentual de uso e cobertura da terra no ano de 1970 na área de estudo	79
Figura 26: Mapa de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 1970.	82
Figura 27: Indicador do grau de erosão hídrica para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, em porcentagem para o ano de 1970.....	85
Figura 28: Mapa de perda de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas no ano de 1970	87
Figura 29: Porcentual de uso e cobertura da terra no ano de 2012 na área de estudo	90
Figura 30: Mapa de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 2012.	92
Figura 31: Indicador do grau de erosão hídrica para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, em porcentagem para o ano de 2012.....	95
Figura 32: Mapa de perda de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas no ano de 2012.	98
Figura 33: Porcentual de uso e cobertura da terra no ano de 2019 na área de estudo	101
Figura 34: Mapa de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 2019.	103

Figura 35: Indicador do grau de erosão hídrica para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, em porcentagem para o ano de 2019.....	106
Figura 36: Mapa de perda de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas no ano de 2019.	109
Figura 37: Perda de solos e uso e cobertura da terra identificados em campo no ano de 2019.	110
Figura 38: Gráficos de porcentual de perda de solo por classe para valores de K da literatura (acima) e calculados pelo método indireto de Sharpley e Williams (1990) (abaixo).	113
Figura 39: Área de solo descoberto afetada por erosão hídrica no bairro Prolar, Cariacica.	114

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: ESCALA DE CLASSIFICAÇÃO DO FATOR R PARA INTERPRETAÇÃO DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE ANUAL PARA O BRASIL, ADAPTADA PARA UNIDADES MÉTRICAS DO SI.....	20
TABELA 2: INDICAÇÃO DOS VALORES DE K EM REAÇÃO AO POTENCIAL DE EROSÃO DE SOLO	24
TABELA 3: VALOR DE P DA EUPS PARA ALGUMAS PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS.....	29
TABELA 4: VALORES DE P EM FUNÇÃO DO DECLIVE PARA A PRÁTICA DE PLANTIO EM CONTORNO E LIMITES MÁXIMOS PARA COMPRIMENTO DE RAMPA (OU ENCOSTA).....	29
TABELA 5: ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO DO FATOR R	52
TABELA 6: COORDENADAS DOS PONTOS AMOSTRAIS ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS DE SOLOS	54
Tabela 7: Fator C de acordo com o uso do solo e suas respectivas referências bibliográficas	60
TABELA 8: ERODIBILIDADE DOS SOLOS COLETADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS.....	69
TABELA 9: ERODIBILIDADE ESPERADA PARA AS CLASSES DE SOLOS PRESENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS, COM REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS.....	70
TABELA 10: ÁREA EM PORCENTUAL E KM ² PARA CADA CLASSE DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA CONSIDERANDO O POTENCIAL NATURAL DE EROSÃO DA BHRDB	76
TABELA 11: ÁREA EM KM ² E HECTARE E PERCENTUAL DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA O ANO DE 1970 DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS.	78
TABELA 12: VALORES DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA CALCULADOS PELA EUPS EM 1970.....	83

TABELA 13: ÁREA EM KM ² E HECTARE E PERCENTUAL DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA O ANO DE 1970 DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS.	89
TABELA 14: VALORES DE PERDA DE SOLO POR EROÇÃO HÍDRICA CALCULADOS PELA EUPS EM 2012.....	93
TABELA 15: ÁREA EM KM ² E HECTARE E PERCENTUAL DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA O ANO DE 1970 DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS.	99
TABELA 16: VALORES DE PERDA DE SOLO POR EROÇÃO HÍDRICA CALCULADOS PELA EUPS EM 2019.....	104
TABELA 17: COMPARATIVO ENTRE OS GRAUS DE PERDA DE SOLO PARA OS ANOS DE 1970, 2012 E 2019 UTILIZANDO A ERODIBILIDADE DISPONIBILIZADA EM TRABALHOS PRÉVIOS E A CALCULADA EM LABORATÓRIO POR MÉTODO INDIRETO	111

LISTA DE SIGLAS E ABREVIações

ANA – Agência Nacional de Águas

APP – Área de Preservação Permanente

ASAS – Alta Subtropical do Atlântico Sul

BHRDB – Bacia hidrográfica do rio Duas Bocas

COS – Carbono Orgânico do Solo

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EUPS – Equação Universal de Perda de Solos

FAO – *Food and Agriculture Organization* ou Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura

IDAF – Instituto de Defesa Agropecuária e Florestal do Espírito Santo

IJSN – Instituto Jones dos Santos Neves

INCAPER - Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência e Extensão Rural

LAMOSAS - Laboratório de Monitoramento e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal do Espírito Santo

LGF-Ufes – Laboratório de Geografia Física da Universidade Federal do Espírito Santo

MDE ou DEM – Modelo Digital de Elevação (*Digital Elevation Map*)

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*, Índice Normalizado de Diferença Vegetal

PNE – Potencial Natural de Erosão

Rebio – Reserva Biológica de Duas Bocas

RMGV – Região Metropolitana da Grande Vitória

SIG – Sistema de Informações Geográficas

TIN – *Triangulated Irregular Network* ou Grade Irregular Triangular

TFSA – Terra fina seca ao ar

USLE – *Universal Soil Loss Equation*

ZCAS – Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCOU – Zona de Convergência de Umidade

SUMÁRIO

1) INTRODUÇÃO	1
2) OBJETIVOS	4
2.1) Objetivo Geral:	4
2.2) Objetivos Específicos:	4
3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1) Erosão dos solos: Um problema mundial	5
3.2) Fatores controladores da erosão dos solos	7
3.3) Equação Universal de Perda dos Solos	12
3.1.1) Fator erosividade das chuvas (R)	14
3.1.2) Fator erodibilidade dos solos (K)	20
3.1.3) Fator topográfico (LS)	25
3.1.4) Fator uso e manejo do solo (C)	27
3.1.5) Fator Prática Conservacionista (P)	28
3.4) Sistemas de Informação Geográfica	30
4) ÁREA DE ESTUDO	33
4.1) Localização geográfica e histórico	33
4.2) Aspectos climáticos	36
4.3) Aspectos Geomorfológicos	39
4.4) Aspectos Pedológicos	41
4.5) Aspectos hidrogeográficos	44
4.6) Aspectos Geológicos	46
5) MATERIAIS E MÉTODOS	49
5.1) Estágio de Preparação	50
5.2) Estágio de Execução	51
5.2.1) Erosividade das chuvas (R)	51
5.2.2) Erodibilidade dos solos (K)	53
5.2.2.1) Trabalhos de campo	54
5.2.2.2) Análise laboratorial dos solos coletados in situ	56
5.2.2.3) Espacialização da Erodibilidade dos Solos	59
5.2.3) Fator topográfico (LS)	59
5.2.4) Uso e cobertura da terra e práticas conservacionistas (CP)	60
5.3) Estágio de Modelagem	64
5.4) Estágio de Resultados Finais e Validação	66
6) RESULTADOS e discussão	67
6.1) Erosividade das Chuvas	67
6.2) Erodibilidade dos Solos	69
6.3) Fator LS	74
6.4) Potencial Natural de Erosão do Solo (PNE)	76

6.5) Perda de solos na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas	78
6.5.1) Uso e Cobertura da Terra em 1970	78
6.5.2) Perda de solo para o ano de 1970.....	83
6.5.3) Uso e Cobertura da Terra em 2012	88
6.5.4) Perda de solo para o ano de 2012.....	93
6.5.5) Uso e Cobertura da Terra em 2019	99
6.5.6) Perda de solo para o ano de 2019.....	104
6.7) Comparativo entre a distribuição da perda de solo nos anos de 1970, 2012 e 2019.	111
7) CONCLUSÕES	116
REFERÊNCIAS	I

1) INTRODUÇÃO

A erosão dos solos é um problema hidrogeomorfológico que afeta diferentes territórios da superfície terrestre, corroborando, por exemplo, para a diminuição do tempo de vida útil de reservatórios, assoreamentos de rios e lagos, e também contribui para a evolução do relevo terrestre.

Por erosão de solos compreende-se o processo de remoção e transporte sedimentar oriundo do intemperismo físico e químico. Entre os seus principais agentes estão as águas das chuvas, o vento e o gelo.

A erosão dos solos pode ocorrer de forma natural, em equilíbrio dinâmico com as características das paisagens adjacentes e, de maneira geral, ocasiona uma produção de sedimentos pequena, capaz de ser suportada pelo ambiente sem consequências adversas. No entanto, quando ocorre a ação antropogênica sobre as encostas, por meio da apropriação do espaço geográfico para diferentes finalidades, sejam aquelas associadas à ocupação humana, para a atividade agropecuária ou para a extração mineral, ocorre uma aceleração na erosão pela ação hídrica, fazendo com que o aporte sedimentar rumo aos rios tenda a aumentar, provocando uma alteração drástica a médio e longo prazo nas características de um dado solo. Esse tipo de acontecimento já foi registrado algumas vezes na história da humanidade, com diversas civilizações perecendo após o esgotamento completo da fertilidade dos solos de uma dada região de maneira irreversível, como a região de Chanting na China (GAO *et al.*, 2011).

O aumento da erosão dos solos é um dos problemas ambientais mais graves e que vem se expandindo globalmente, juntamente com a indisponibilidade hídrica e de energia e a perda da biodiversidade (PIMENTEL, 2006). Ele afeta a produtividade de todos os ecossistemas naturais, assim como as de culturas agrícolas, florestas e pastagens.

Dada a importância do solo para a manutenção da vida, com sua renovação em escala temporal geológica, sendo fundamental para sobrevivência humana, desde a produção de alimentos, sendo responsável por cultivar alimentos de mais de 99,7% de calorias da alimentação humana (PIMENTEL, 2006), até no ciclo hidrológico, no

processo de infiltração da água precipitada, na vazão no leito dos rios, passando ainda pelo armazenamento subterrâneo, é fundamental estudar os efeitos da evolução do grau de intensificação erosão hídrica sobre ele (OSMAN, 2014).

Salienta-se que o processo erosivo é um fenômeno que ocorre naturalmente, mas que com o aumento da exploração antrópica sobre sua superfície, sua cobertura vegetal natural é alterada e suas partículas sofrem um processo de compactação que impede o processo de infiltração e facilita o escoamento de partículas através do volume saturado do meio durante os eventos de precipitação, num processo conhecido como erosão hídrica (ZACHAR, 1982).

Uma das maneiras mais efetivas de se examinar e/ou prever a erosão dos solos, diante das adversidades impostas pela sobre-exploração se dá através da utilização de modelos matemáticos. Entre eles, destaca-se a *Universal Soil Loss Equation* (USLE), ou Equação Universal de Perda de Solos – EUPS (WISCHMEIER; SMITH, 1978), desenvolvida para prever as perdas por erosão hídrica laminar, em toneladas por ano, a partir de condições específicas para campos agrários dos Estados Unidos, mas que em virtude da relativa simplicidade de obtenção de seus parâmetros foi readequada para várias outras regiões. (DEVATHA; DESHPANDE; RENUKAPRASAD, 2015; ŽIVOTIĆ *et al.*, 2012).

Exemplos da utilização deste modelo pode ser verificado nos trabalhos de Simanton e Renard (1982) e Merriam (2005) nos Estados Unidos, de Bagarello (2012) e Životić (2012) na Europa, de Bhane e Mekonen (2009) na África, além de Honorato *et al.* (2001) e Gaspari, Rodríguez Vagaría e Senisterra (2009) na América do Sul. No Brasil, a modelagem da erosão dos solos por meio da EUPS estão presentes nos trabalhos de Poloni (2010), que aplicou a modelagem em uma pequena bacia hidrográfica da região de Itarana-ES através do suporte participativo com a comunidade local visando a adequação do modelo teórico para a realidade encontrada entre os pequenos produtores agrícolas, Matos (2015), que utilizou a EUPS para determinar áreas vulneráveis à erosão na região de Salto do Paroapeba em Minas Gerais, visando a utilização mais sustentável de recursos hídricos e subsidiar medidas de manejo mais adequadas, Ribeiro (2006) que mapeou a susceptibilidade e o risco de erosão para o município de Campos-RJ a partir de análises cartográficas e Oliveira (2011) que

analisou a perda de solo na bacia hidrográfica do ribeirão do Feijão em São Carlos-SP.

No entanto, são poucas as pesquisas (POLONI, 2010) que abordam a questão da evolução espaço-temporal da erosão hídrica, especialmente pela dificuldade de obtenção de dados a longo prazo. Neste trabalho, pretende-se realizar um comparativo entre três décadas distintas e as tendências de evolução dos processos erosivos pelo processo laminar, justificando a importância dessa pesquisa, registrada em uma área de estudo diversificada, a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, que contempla diversos estudos de natureza hidrossedimentológica e conectividade hidrológica há 25 anos (MARCHIORO, 1996; LÓPEZ 2016; CUPERTINO, 2018; LEMOS, 2018; FERREIRA, 2019).

Também é válido frisar que, segundo Santos e Marchioro (2020) a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas vem sofrendo um processo de expansão da área de fronteira agrícola e de expansão urbana, e que boa parte de seu território (79,66%) se encontra no município de Cariacica, que registrou aumento populacional de 40,96% entre os anos de 1990 e 2010 (IBGE, 2010). Desta maneira, torna-se estratégico avaliar os efeitos dessas alterações e as tendências dos efeitos erosivos para essa localidade, responsável por fornecer água potável para uma parcela significativa da população cariaciquense, além de abrigar dezenas de propriedades rurais de pequeno porte, que contribuem de maneira expressiva para a economia do município.

2) OBJETIVOS

2.1) Objetivo Geral:

Identificar e discutir a evolução espaço-temporal da erosão hídrica dos solos na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas nos recortes temporais de 1970, 2012 e 2019.

2.2) Objetivos Específicos:

1- Localizar as áreas de maior e menor produção de sedimentos para os anos de 1970; 2012 e 2019;

2 – Analisar a distribuição espacial da erodibilidade dos solos na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas.

3) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Entre os diversos tópicos que foram revisados para o cumprimento dos objetivos do trabalho, os seguintes estão presentes: a gravidade da erosão dos solos enquanto problema mundial; os fatores que controlam as erosões dos solos, a Equação Universal da Perda dos Solos e seus fatores e os Sistemas de Informações Geográficas e suas aplicações.

3.1) Erosão dos solos: Um problema mundial

A degradação dos solos, definida como a redução e perda das funções do solo, tem se tornado um problema cada vez mais sério em escala mundial nas últimas décadas e se apresenta como uma ameaça para o ecossistema terrestre, tanto como fator de alteração e transformação das paisagens, como também na forma de suporte para a agricultura e pecuária (CHEN *et al.*, 2002).

É importante compreender que a erosão dos solos é um processo natural e pode ser acentuada ou diminuída por uma variedade de atividades antrópicas. O manejo inadequado e os desastres ecológicos são exemplos de como o ser humano pode acelerar o processo erosivo (GONZÁLEZ, 2003).

Na segunda metade do século XX, cerca de um terço dos solos agrícolas da Terra deixaram de ser produtivos para este tipo de uso devido aos efeitos erosivos (PIMENTEL, 2006). As consequências desse fenômeno incluem o aumento no custo de produção de alimentos, diminuição na produtividade das colheitas e abandono da atividade agrícola. Em países de maior vulnerabilidade econômica e menor fiscalização ambiental, o cultivo agrícola ocorre em terras marginais, o que acentua ainda mais os efeitos da erosão (GARCÍA-RUIZ *et al.*, 2015)

Nos últimos anos, a construção e a urbanização ocorreu em mais zonas do que em todas as áreas urbanas dos séculos anteriores (TOY *et al.*, apud. GARCÍA-CHEVESICH, 2010, p.18) e os sítios de obras representam a atividade humana mais devastadora em termos erosivos, devido a agressividade espacial e temporal

associada a estes. Em alguns lugares, como nos Estados Unidos, já existem restrições e regulações severas quanto ao controle da erosão e produção sedimentar que se aplicam à indústria da construção civil.

As atividades do setor agropecuário também provocam um dano permanente aos solos, que se traduz em erosão e sedimentação. O sobrepastoreio não apenas reduz a cobertura vegetal protetora dos solos, como também compacta o solo, produzindo mais escoamento superficial e origina diversos processos erosivos (figura 1). É uma prática muito comum nos países em desenvolvimento, que representa uma transformação irreversível da paisagem rumo à desertificação. Em geral, as práticas agrícolas expõem o solo ao impacto das gotas de chuva, somando-se à erosão hídrica provocada pelos canais de escoamento (GARCÍA-CHEVESICH, 2010).

Figura 1: Evidências de erosão hídrica provocada por sobrepastoreio, com resquício de partículas de solo de maiores dimensões em La Lígua, Chile.



Fonte: García-Chevesich (2010)

A mineração, em especial a ocorrida em zonas com climas chuvosos também tem representado um grande problema para a mitigação dos efeitos erosivos proporcionados pela atividade humana. Os resíduos do extrativismo mineral são compostos não apenas por sedimentos, mas também por elementos tóxicos que, quando contaminam os solos, dificultam o crescimento vegetal que protegeria o solo dos efeitos da erosão hídrica.

Nem mesmo as áreas florestais estão imunes aos efeitos da atividade humana e suas consequências sobre o aumento da erosão dos solos. A abertura de clareiras e construção de estradas afetam grandemente o ciclo hidrológico, o que se traduz em uma diminuição na interceptação das copas e na capacidade de infiltração dos solos. O crescente número de queimadas e incêndios, seja por causas naturais ou artificiais, também alteram de maneira significativa a dinâmica de águas nos canais de drenagem (GARCÍA-CHEVESICH, 2010).

Desta maneira, os estudos visando mitigar os efeitos da atividade humana sobre a erosão se mostram cada vez mais necessários para assegurar sua conservação ante tantos riscos proporcionados pela exploração discriminada desse recurso primordial para a manutenção do equilíbrio dinâmico dos sistemas ambientais e das paisagens terrestres.

3.2) Fatores controladores da erosão dos solos

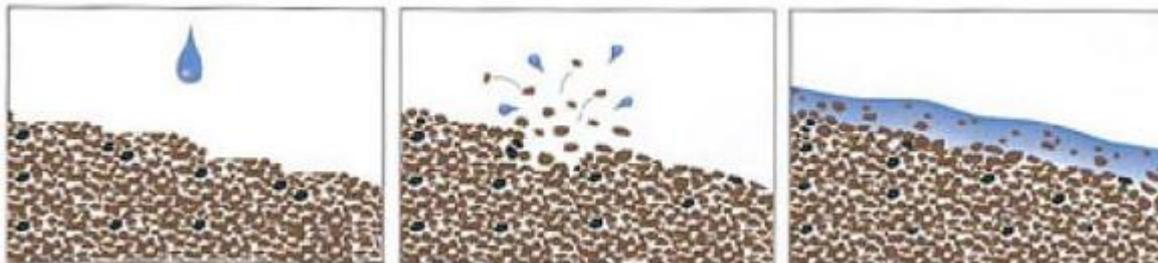
Os principais fatores que influenciam a erosão dos solos são: a chuva, a infiltração, a topografia do terreno, a cobertura vegetal e a natureza do solo.

Quanto à chuva, sua importância no controle da erosão se dá em virtude de ser a força motriz do processo erosivo por salpicamento, isto é, quando se dá o princípio do processo de erosão. Segundo Guerra (2005):

“A ação do *splash*, também conhecida por erosão por salpicamento, em português, é o estágio inicial do processo erosivo, pois prepara as partículas que compõem o solo, para serem transportadas pelo escoamento superficial. Essa preparação se dá tanto pela ruptura dos agregados, quebrando-os em tamanhos menores, como pela própria ação transportadora que o salpicamento provoca nas partículas dos solos” Guerra (2005, pg. 18).

Como consequência, os agregados desarranjados pelo processo de *splash* podem se direcionar para a parte porosa do solo, aumentando o escoamento superficial e reduzindo os índices de infiltração, formando um ambiente favorável para maior perda de solo. A figura 2 demonstra esse processo.

Figura 2: Processo de erosão por salpicamento, desagregação de frações de solo e preenchimento de microporos entre partículas



Fonte: Adaptado de Water Erosion of Agricultural Land (2021)

Conforme Guerra (2005), as características pluviométricas que devem ser observadas são: a intensidade da chuva, sua frequência e duração, sendo a intensidade o fator de maior importância. A gota de chuva é capaz de formar crostas, tornando a superfície do solo impermeável, assim, aumentando o escoamento superficial.

A infiltração, por sua vez, refere-se à movimentação da água dentro da superfície do solo, atuando de maneira inversamente proporcional a velocidade de escoamento superficial e é afetada por fatores intrínsecos ao solo, tais como estrutura, textura, teor de matéria orgânica, mas também por fatores externos como a cobertura vegetal e o preparo, ainda que estes ajam de maneira temporária (GUERRA, 2005).

Há uma relação direta entre a intensidade do escoamento superficial e a capacidade de infiltração de água de um dado solo. De acordo com Bertoni e Lombardi Neto (1990):

“Durante uma chuva, a velocidade máxima de infiltração ocorre no começo, e usualmente decresce muito rapidamente, de acordo com alterações na estrutura da superfície do solo. Se a chuva continua, a velocidade de infiltração gradualmente vai se aproximando de um valor mínimo, determinado pela velocidade com que a água pode entrar na camada superficial e pela velocidade com que ela pode penetrar através do perfil” (Bertoni e Lombardi Neto, 1990, pg. 50).

A afirmação dos autores é justificada pelo gráfico a seguir (figura 3).

Figura 3: Intensidade de chuva, taxa de escoamento superficial e capacidade de infiltração para uma chuva artificial de intensidade constante em parcela experimental



Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (1990)

Em relação à topografia, sua representatividade se dá através dos fatores de declividade e comprimento de rampa, que interferem diretamente na velocidade da enxurrada ao longo da encosta. Ou seja, quanto maiores o comprimento e declividade da rampa, maior será a velocidade da água na superfície do declive, quando consideramos condições iguais de solo, cobertura vegetal e outros aspectos ambientais. De igual maneira, se houver redução de comprimento e declividade de rampa, menor será a velocidade de escoamento na superfície da encosta.

Conforme a velocidade da enxurrada aumentar ao longo da encosta, maior também será seu potencial de transporte de materiais. Bertoni e Lombardi Neto (1990) salientam que “se duplicarmos a velocidade de escoamento, a quantidade de material que pode ser arrastado aumenta em 32 vezes e o tamanho das partículas que podem ser transportadas aumenta em 64 vezes”, e em relação ao comprimento de rampa dizem que: “não é menos importante que o declive, pois à medida que o caminho percorrido vai aumentando, não somente as águas vão se avolumando proporcionalmente como, também, sua velocidade de escoamento vai aumentando proporcionalmente”.

A forma da encosta também deve ser considerada ao se estudar a erosão. Resende (1985) afirma que “Além do declive e do comprimento da encosta (rampa), a forma desta é importante no que se refere à erosão. A remoção de partículas e água é

diferente, quer seja a encosta côncava, linear ou convexa”. O quadro 1 a seguir ilustra os efeitos das formas de vertentes em relação à erosão.

QUADRO 1: RELACIONAMENTO GERAL ENTRE AS PEDOFORMAS CÔNCAVAS E CONVEXAS E ASPECTOS LIGADOS À EROSIÃO

Côncava	Convexa
Convergência das águas	Divergência das águas
Erosão localizada; Tendência à formação de sulcos e voçorocas	Erosão mais uniforme e laminar
Espessura do “solum” tende a ser desigual	Espessura do “solum” tende a ser mais uniforme
Erosão e deposição	Apenas erosão
Sementes e nutrientes acumulados nas partes mais baixas	Sementes e nutrientes são retirados do sistema
Estabilidade maior se dá pela ausência de cobertura vegetal densa nas áreas de concentração de água	Instabilidade maior ocorre devido a concentração de água

Fonte: Adaptado de Resende (1985)

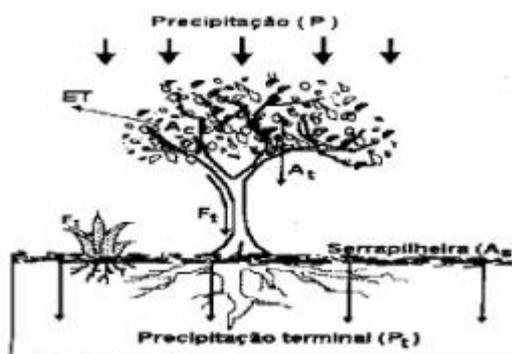
O papel da cobertura vegetal no controle e prevenção de processos erosivos é bastante diversificado. Ela protege o solo contra o impacto direto da gota de chuva, o que evita a desestruturação do agregado e a formação de crostas, contendo mecanismos de interceptação de chuvas. Guerra e Botelho (2001) apontam que uma das múltiplas funções da cobertura vegetal é o papel de interceptar parte da precipitação através do armazenamento de água nas copas arbóreas e/ou arbustivas, de onde este volume hídrico é perdido para a atmosfera por meio da evapotranspiração durante os eventos de chuva e, principalmente, após o término deles. O sistema radicular também atua no processo de proteção, permitindo uma melhor permeabilidade do solo ao formar pequenos canais através do solo, facilitando a infiltração e favorecendo o aumento do aporte de matéria orgânica, que apresenta capacidade de reter água e melhorar a estrutura do solo (Guerra e Botelho, 2001).

A vegetação ainda proporciona uma diminuição da velocidade da água ao longo do terreno, na forma de obstáculos ao escoamento. O tipo de cobertura vegetal presente no solo influencia nos resultados, portanto, é importante haver compatibilidade do uso do solo com o tipo e o relevo, bem como buscar práticas agrícolas que favoreçam um maior aporte de cobertura vegetal no solo. Um exemplo de investigação a respeito do

papel da cobertura vegetal ante os efeitos erosivos é o de Lobo (2017) que concluiu que o fator que mais influencia no escoamento hídrico de águas pluviais que escoam pelos troncos e chegam na superfície dos solos é a rugosidade dos troncos das árvores.

A figura 4 a seguir mostra a função estabilizadora promovida pela vegetação no ambiente através das várias maneiras em que a cobertura vegetal intercepta a água.

Figura 4: Componentes da interceptação: P é precipitação; ET é evapotranspiração; AC é armazenamento nas copas; AT é atravessamento nas copas e FT é fluxo de troncos



Fonte: Adaptado de Dunne e Leopold, (1978)

Finalmente, a natureza do solo, ou erodibilidade, é a sua capacidade intrínseca de resistir à erosão. Cada solo apresenta uma erodibilidade única e própria, o que é bem definido por Bertoni e Lombardi Neto (1990) que afirmam que as propriedades físicas, em especial, "... estrutura, textura, permeabilidade e densidade, assim como as características químicas e biológicas do solo exercem diferentes influências na erosão".

Guerra (2005) também ressalta a importância de se estudar os aspectos relacionados à textura, pois o tamanho das partículas que constituem o solo influencia em aspectos como infiltração e a capacidade de resistência ao arraste pela água, além de outros aspectos tais como estrutura, tipo e teor de argila e percentual de matéria orgânica. Ele também comenta acerca do destaque dado à presença de íons Al^{3+} em solos tropicais, que atuam como elementos floculantes em climas quentes e úmidos e tornam os agregados de solo mais estáveis e, por consequência, façam com que o processo de intemperismo de elevada intensidade deixe os solos mais arenosos.

De acordo com Guerra (2005), a erodibilidade do solo não é estática, mas sim, uma função que depende do tempo. Ou seja, o uso que o ser humano aplica ao solo pode alterar drasticamente a erodibilidade deste, por exemplo, no caso da utilização agrícola, que altera suas características químicas e físicas através dos processos de aragem mecânica, introdução de suplementação de matéria orgânica, na estabilidade de agregados ou do grau de umidade de maneira artificial.

O quadro 2 apresenta algumas tendências para os graus de erodibilidade do solo de acordo com algumas das suas características.

QUADRO 2 — TENDÊNCIAS DE ERODIBILIDADE DO SOLO DE ACORDO COM GRANULOMETRIA, MATÉRIA ORGÂNICA E OUTROS FATORES

Tendências de erodibilidade do solo
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Baixa em materiais de elevada granulometria ➤ Elevada em siltes e areias finas ➤ Diminui com o aumento da argila e matéria orgânica ➤ Diminui com o aumento da cobertura vegetal e o teor de umidade anterior ➤ Aumenta com o incremento da taxa de adsorção do sódio e com a diminuição da força iônica da água

Fonte: Guerra (2005)

3.3) Equação Universal de Perda dos Solos

A questão da erosão de solos como uma preocupação de caráter público é historicamente recente, datando da primeira metade do século passado (DULEY; HAYS, 1932; KRUSEKOPF, 1943).

Com o investimento público do governo estadunidense através do Departamento de Agricultura a partir da década de 1940, desenvolveu-se uma rede nacional de pesquisa em diversas regiões com o fim de se criar uma base de dados para se estabelecer uma rede de práticas conservacionistas apropriadas para a realidade de cada local (LAFLEN; MOLDENHAUER, 2003).

A fim de se consolidar uma metodologia que pudesse ser replicada e comparada, a partir de 1954 foi desenvolvida a chamada *Universal Soil Loss Equation* (USLE), em português, Equação Universal de Perda de Solos (EUPS), pelo National Runoff and Data Soil Loss Center em parceria com a Universidade de Purdue (Indiana, EUA).

Em sua versão original, a predição de perda de solos era utilizada primariamente em trechos de declives uniformes e com baixa inclinação. Em sua primeira revisão, de 1965, a EUPS passou a ter um fator quantitativo de erodibilidade do solo calculado a partir de parâmetros próprios, independentes do clima e topografia locais. Apenas na sua revisão de 1978, feita por Wischmeier e Smith, sendo a mais utilizada até os dias contemporâneos em virtude da relativa simplicidade de obtenção de dados, a equação levaria em consideração a dimensão da complexidade das formas e concavidades do solo para se estimar o total de erosão em uma dada área (OLIVEIRA, 2011).

A EUPS, portanto, em sua versão mais difundida, é uma equação que calcula a perda de solo (A), dimensionada em toneladas por hectare ano, a partir da multiplicação das variáveis dispostas na equação 1 (WISCHMEIER; SMITH, 1978):

$$A = R * K * LS * C * P$$

Equação 1

Onde:

A – Perda de solo (t/ha. ano);

R – Fator erosividade das chuvas (MJ.mm/ha. ano);

K – Fator erodibilidade do solo (t.h/MJ.mm);

LS – Fator Topográfico: produto do comprimento de rampa pelo grau de inclinação do declive (adimensional);¹

¹ Na equação original, o fator topográfico (LS) é representado de maneira separada como duas variáveis distintas, L e S, porém, os autores avaliam os efeitos da topografia de forma conjunta.

C – Fator de uso e manejo do solo (adimensional);

P – Fator de práticas conservacionistas (adimensional).

Com os resultados desse cálculo, é possível estimar a erosão dos solos por ação hídrica para uma dada área a partir do impacto da precipitação sobre o solo e seus desdobramentos de acordo com sua composição, características topográficas e até mesmo intervenções antrópicas sobre o meio. No entanto, convém ressaltar que, como toda modelagem, trata-se de uma simplificação da realidade, que não contempla toda a infinidade de variáveis que podem atuar sobre este fenômeno. No caso da EUPS, a escolha dos fatores a torna apropriada para prever a erosão que ocorrerá por ação laminar, de médio a longo prazo.

De acordo com Farinasso et. al (2006), a EUPS, apesar de ser utilizada originalmente em pequenos talhões, pode ser empregada em grandes áreas ou em escalas regionais, permitindo avaliar qualitativamente e geograficamente as áreas de diferentes graus de susceptibilidade à erosão hídrica, sendo um instrumento valioso para o auxílio de trabalhos de gestão ambiental e, para a compreensão da evolução do relevo devido a erosão.

3.1.1) Fator erosividade das chuvas (R)

Trata-se de um índice que expressa, em quantidade numérica, o potencial de erosão causado pela precipitação em uma área sem proteção ou cobertura (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

A erosão dos solos está diretamente relacionada às precipitações quando as gotas de chuva atingem a superfície do solo, o que se aplica particularmente para a erosão do tipo laminar. Neste caso, a intensidade dos temporais é considerada a característica de maior influência para o efeito desarticulador das partículas de solo no ponto onde atingem a superfície terrestre, pois a energia cinética impressa pela água é suficiente para remover micro agregados de solo coeso.

Além disso, a intensidade da chuva contribui para os processos posteriores à erosão, pois as gotículas, através do efeito de salpicamento (*splash*) sobre a superfície terrestre, transportam as partículas despreendidas, e ainda fornecem energia para que a água saturada sobre o solo possa escoar de maneira turbulenta por maiores distâncias (MORGAN, 2005).

De acordo com Wischmeier e Smith (1978), em sua equação original, o índice proposto para o fator R utilizaria o EI_{30} , que é o produto da energia cinética da chuva pela intensidade máxima ocorrida em qualquer intervalo de 30 minutos ininterruptos, pois tal índice representa o efeito erosivo do impacto das gotas de chuva e também o das enxurradas (LAL, 2017). Assim, como disposto na equação 2:

$$EI_{30} = E_K * I_{30}$$

Equação 2

Onde:

EI_{30} = Índice de erosão (MJ/ha.mm/h);

E_k = Energia cinética da chuva por unidade de área (MJ/ha);

I_{30} = Intensidade máxima de chuva (mm/h).

A energia cinética da chuva, por sua vez, de acordo com os proponentes originais da EUPS (WISCHMEIER; SMITH, 1978), é uma função logarítmica, descrita abaixo na equação 3:

$$E_k = 0,119 + 0,0873 \log I$$

Equação 3

Sendo:

E_k = Energia cinética por unidade de área (MJ/ha);

I = Intensidade da chuva (mm/h)

Para intervalos de tempo mais amplos, tais como anuais, o fator R pode ser representado como o somatório dos valores de EI . Logo, conforme a equação 4:

$$R = \sum_{j=1}^n EI_j$$

Equação 4

Com:

R = Erosividade das chuvas para a Equação Universal de Perda dos Solos (MJ.mm/ha. a)

n =Número total de eventos registrados.

O cálculo de R é um processo complexo e envolve a coleta de uma série histórica de pelo menos 20 anos de dados para obtenção de dados acurados. Além disso, muitas vezes os dados de intensidade de chuvas ao longo de 30 minutos não estão disponíveis de maneira acessível em muitas partes do mundo, visto que os monitoramentos que fornecem esses dados requerem pluviômetros.

Pelos motivos apresentados, muitas tentativas foram estabelecidas para se estimar o fator R como uma função da média anual de precipitação (P), um parâmetro de obtenção mais fácil (COOPER, 2011). Tal índice, desenvolvido por Fournier (1960), apresenta uma elevada correlação entre a erosão anual total e a distribuição das precipitações, sendo descrito pela equação 5:

$$F = \frac{p^2}{P}$$

Equação 5

Sendo:

F = Índice de Fournier;

p = Precipitação máxima mensal (mm);

P = Precipitação total anual (mm).

Há de se considerar que uma grande diferença entre o cálculo do Índice de Fournier e o fator R, é que, embora não haja mais a necessidade de se saber o valor de EI₃₀, o Índice de Fournier considera apenas os eventos do mês com maior índice de precipitação. Para minimizar os efeitos dessa discrepância, foi desenvolvido o Índice Modificado de Fournier (MFI, *Modified Fournier Index*) por Arnoldus (1980 *apud* Morgan, 2005), para que as chuvas que ocorressem fora do mês de máxima precipitação aumentassem o valor máximo do novo índice, tornando-o mais preciso, como exibido adiante na equação 6:

$$MFI = \sum_{i=1}^{12} \frac{p_i^2}{P}$$

Equação 6

Em que:

MFI = Índice Modificado de Fournier;

p_i = Precipitação média mensal (mm);

P = Precipitação anual (mm).

No Brasil, o Índice Modificado de Fournier como substituto para o fator R teve sua primeira aplicação a partir do trabalho de Lombardi Neto e Moldenhauer (1992), sendo desenvolvido e adaptado a partir da análise de 22 anos de registros de precipitações na região de Campinas, entre 1954 e 1975. Trata-se de um método de ampla acreditação, cuja metodologia fora replicada múltiplas vezes dentro e fora do país (HERNANI *et al.*, 1997; RANIERI, 2002; BACCHI; REOCHARDT; SPAROVEK, 2003; GALDINO; GREGO; SILVA, 2014). Eles registraram uma alta correlação entre as médias mensais do índice de erosão e do coeficiente de chuva, demonstrada pela equação 7:

$$EI = 68,730 \left(\frac{p^2}{P} \right)^{0,841}$$

Equação 7

Sendo:

EI = Média mensal do índice de erosão (MJ.mm/ha.h);

p = Precipitação média mensal (mm);

P = Precipitação média anual (mm).

Conforme Silva (2004), a partir do EI descrito acima, outros autores desenvolveriam relações similares com variações do Índice Modificado de Fournier, na forma de equações lineares ou exponenciais com a utilização de dados pluviométricos, nas formas $y = ax + b$ ou $y = ax^b$, com y sendo o fator R da EUPS, x o valor de precipitação média (por intervalo de tempo) e a e b sendo constantes.

Martins et al. (2010) desenvolveram uma relação linear para o cálculo da erosividade das chuvas para o município de Aracruz (ES), a erosividade poderia ser estimada a partir da relação expressa abaixo na equação 8:

$$y = (7,9075 * x) - 40,578$$

Equação 8

Onde:

y = fator R de erosividade das chuvas para a Equação Universal de Perda dos Solos (MJ.mm/ha. a)

x = Precipitação anual (mm)

Por conta da proximidade com a área de estudo (aproximadamente 90 quilômetros ao norte da Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas), e por apresentar um bom coeficiente de determinação ($R^2 = 0,61$), o índice de erosividade de Martins et. al (2010) foi o escolhido para este trabalho.

Para a representação gráfica dessa variável, obtida a partir dos dados de pluviômetros nas cercanias da região estudada, é feita uma interpolação espacial, estabelecendo as coordenadas geográficas das estações que mensuraram a quantidade de chuva como pontos de referência. Diversos estudos (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995; FARINASSO et. al., 2006; AKKALA et. al., 2010) demonstraram a efetividade do método de interpolação da Krigagem Ordinária para fenômenos climáticos, resultando em produtos conhecidos como Mapas Isoderentes.

Tais mapas são de grande serventia para conservacionistas e produtores agrícolas, uma vez que fornecem informação sobre o potencial erosivo das chuvas de uma dada região e ampliam o conhecimento sobre a implementação de planos de minimização da erosão em áreas específicas (SILVA, 2004).

De acordo com Carvalho (1994), o fator R pode ser classificado conforme a escala demonstrada abaixo (tabela 1):

TABELA 1: ESCALA DE CLASSIFICAÇÃO DO FATOR R PARA INTERPRETAÇÃO DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE ANUAL PARA O BRASIL, ADAPTADA PARA UNIDADES MÉTRICAS DO SI

Intervalo (MJ.mm/(ha.ano))	Interpretação
R < 2452	Erosividade fraca
2452 < R < 4905	Erosividade média
4905 < R < 7357	Erosividade média a forte
7357 < R < 9810	Erosividade forte
R > 9810	Erosividade muito forte

Fonte: Carvalho (1994)

3.1.2) Fator erodibilidade dos solos (K)

A erodibilidade do solo, de acordo com Bastos (2004), pode ser definida como “a propriedade do solo que expressa a maior ou menor facilidade com que suas partículas são desprendidas por um agente erosivo”. No caso da EUPS, ela é expressa através de um valor quantitativo definido de maneira experimental que se correlaciona por uma unidade de área.

A resistência do solo aos agentes erosivos expressa por essa propriedade depende de características inatas à sua composição, dentre elas: granulometria, mineralogia, constituição química, arranjo estrutural, permeabilidade, capacidade de infiltração e grau de coesão entre partículas (NOGAMI; VILLIBOR, 1995).

O fator K pode ser determinado no campo de maneira direta, com chuva natural, ou simulada em parcelas padrão, ou ainda ser determinado indiretamente, a partir de métodos empíricos. Usualmente, em virtude de questões financeiras e de tempo, ele é calculado de maneira indireta, visto que o trabalho em parcelas demanda anos de monitoramento (CORRECHEL, 2003).

Um método de cálculo do fator K, proposto por Wischmeier e Smith (1978), para a obtenção indireta desse parâmetro é o definido na equação 9, a seguir:

$$K_1 = \left\{ \frac{[2,1(10^{-4})(12 - MO)M^{1,14} + 3,25(EST - 2) + 2,5(PER - 3)]}{100} \right\} 0,1317$$

Equação 9

Onde:

K_1 = Erodibilidade do solo (t. h/MJ.mm);

M = Soma dos teores de silte (%) e areia muito fina (%) multiplicada por 100 menos o teor de argila (%), com a análise granulométrica sendo realizada com uso de NaOH 1 mol L⁻¹ como dispersante;

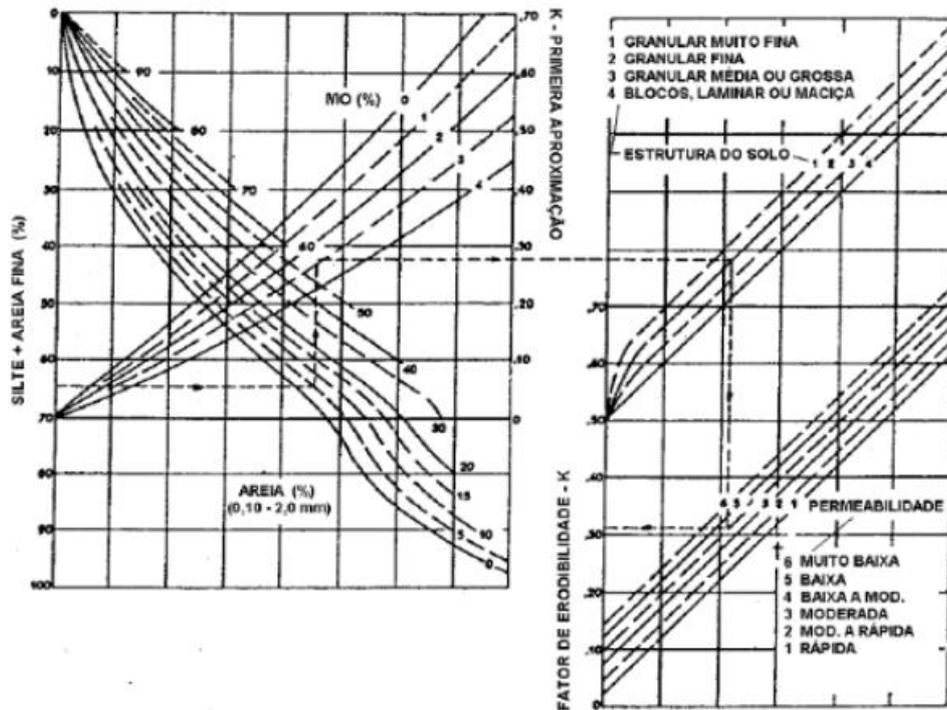
MO = Teor de matéria orgânica (%);

EST = Coeficiente relativo à estrutura do solo (adimensional);

PER = Coeficiente relativo à classe de permeabilidade do solo (adimensional).

A combinação gráfica dos elementos que constituem tal equação é representada por um nomograma, representado abaixo (figura 5). No entanto, as aproximações não se aplicam para todas as regiões, uma vez que a composição dos solos utilizados para a confecção dessa ferramenta diverge bastante dos encontrados no território brasileiro.

Figura 5: Nomograma de Wischmeier de erodibilidade do solo



Fonte: Wischmeier (1971) *apud* (Bastos, 2004)

Em termos locais, Denardin (1990 *apud* Correchel, 2003) foi o pioneiro em estimar o fator K para solos brasileiros através do método indireto, trabalhando com 31 classes. Seus ajustes foram os que mais se aproximaram do método direto e são representados pela equação:

$$K_2 = 0,00684 (PER) + 0,00834286 (MO) - 0,00116162 (AL) - 0,00037756 (PART)$$

Equação 10

Em que:

K_2 = Erodibilidade do solo (t. h/MJ.mm);

PER = Coeficiente relativo à classe de permeabilidade do solo (adimensional);

MO = Teor de matéria orgânica (%);

AL = Teor de Al₂O₃ da fração TFSA (%);

PART = Teor de partículas com diâmetro entre 0,5 e 2,0 mm (%), com a análise granulométrica sendo realizada com uso de NaOH 1 mol L⁻¹ como dispersante;

Outra maneira de se calcular a erodibilidade do solo indiretamente é a proposta por Williams definida pela equação:

$$K_3 = f_{csand} \cdot f_{ci-si} \cdot f_{orgc} \cdot f_{hisand} \cdot 0,1317$$

Equação 11

Em que: K₃ é a erodibilidade do solo (t. h/MJ.mm), f_{csand} é o fator de baixa erodibilidade dos solos com elevados índices de areia grossa, f_{ci-si} é o fator de baixa erodibilidade de solos com altas taxas de silte e argila, f_{orgc} é o fator que reduz a erodibilidade de solos com altos teores de carbono orgânico e f_{hisand} é o fator que reduz a erodibilidade dos solos com altos teores de areia. Estes índices são obtidos através das equações, 12, 13, 14 e 15, respectivamente

$$f_{csand} = \left\{ 0.2 + 0.3 \cdot \exp \left[-0,0256 \cdot m_s \left(1 - \frac{m_{silt}}{100} \right) \right] \right\}$$

Equação 12

$$f_{ci-si} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}} \right)^{0,3}$$

Equação 13

$$f_{orgc} = 1 - \left[\frac{0,25 \cdot orgC}{orgC + \exp(3,72 - 2,95 \cdot orgC)} \right]$$

Equação 14

$$f_{hisand} = \left\{ 1 - \frac{0,7 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)}{\left(1 - \frac{m_s}{100}\right) + \exp\left[-5,51 + 22,9 \cdot \left(1 - \frac{m_s}{100}\right)\right]} \right\}$$

Equação 15

Em que: m_s é o percentual de areia, m_{silt} é o percentual de silte, m_c é o percentual de argila e $orgC$ é o percentual de carbono orgânico contido no horizonte.

No entanto, Correchel (2003) aponta que obter o fator K indiretamente, apesar de ser mais conveniente, requer cautela. Segundo a autora:

As vantagens da utilização de métodos (indiretos) são a rapidez na determinação da erodibilidade dos solos, em comparação com métodos diretos convencionais, e a possibilidade de sua estimativa através de parâmetros obtidos por análises laboratoriais de fácil execução. Infelizmente, a indefinição do método mais adequado para maior amplitude possível de solos dificulta a padronização de obtenção do fator K para aplicação da USLE, mesmo para condições regionais. (CORRECHEL, 2003, p. 6)

Para indicar o potencial de erodibilidade do solo, Carvalho (1994) indica três diferentes graus para o fator K, descritos na tabela 2 a seguir:

TABELA 2: INDICAÇÃO DOS VALORES DE K EM REAÇÃO AO POTENCIAL DE EROÇÃO DE SOLO

Intervalo	Interpretação
$K < 0,15$	Erodibilidade baixa
$0,15 < K < 0,30$	Erodibilidade média
$K > 0,30$	Erodibilidade alta

Fonte: Carvalho (1994)

3.1.3) Fator topográfico (LS)

O denominado fator topográfico, é o produto do comprimento da vertente (L) por sua declividade (S). As duas variáveis afetam grandemente o processo de erosão hídrica do solo, uma vez que o aumento do comprimento da vertente provoca um incremento na perda de solo total e na perda de solo por unidade de área em virtude do acúmulo progressivo superficial em direção a região de menor declividade, e com o aumento da declividade da vertente, há ganho de velocidade de escoamento e da erosividade proveniente do escoamento superficial (CHECCHIA, 2005). Proporcionalmente, quando a declividade se torna mais suave, a velocidade de escoamento e a erosividade irão diminuir.

Ao se utilizar estimativas de perda de solo para planejamento, conservação e proteção de recursos do solo, o comprimento da vertente é definido como a distância da origem do fluxo superficial em direção a um ponto ao longo do perfil da vertente que pode ser caracterizado de duas maneiras: ou pela ocorrência da deposição do solo erodido graças à diminuição do gradiente de declividade, ou pelo local em que o escoamento superficial se concentra, dando origem a um canal (RENARD et. al, 1997).

De acordo com Wischmeier e Smith (1978), o fator L tem valor igual a 1 para uma parcela-padrão de 22m e um gradiente de declividade de 9%, sendo inferior a 1 para parcelas de comprimento menor que o padrão e superior a 1 para parcelas com comprimento maior que 22m. O mesmo ocorre para o fator S, sendo igual a 1 para a declividade de 9% e comprimento de 22m, menor que 1 para gradientes menos declivosos e superior a 1 para gradientes mais angulados. Porém, quando ocorre o aumento de declividade, as perdas de solo tendem a ser maiores do que quando ocorre o aumento do comprimento da vertente.

Originalmente calculado através de levantamentos *in situ* e manualmente, o método para o levantamento do fator topográfico requer demasiado tempo para ser concluído e provê um número limitado de dados. Ademais, embora a declividade possa ser mensurada através de cartas topográficas de maneira relativamente simples, medir o comprimento das vertentes em certos pontos pode se tornar uma tarefa árdua, já que

levantamentos realizados por operadores diferentes em um mesmo ponto podem resultar em resultados distintos (SILVA, 2007).

Para contornar as adversidades do método manual, com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas, é possível determinar de maneira automática o fator LS para grandes áreas a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Um dos algoritmos que calcula o fator topográfico foi desenvolvido por Desmet e Govers (1996), que aprimoraram a metodologia de aquisição do fator L, ao introduzir a área de contribuição. Nesta variável, para cada célula, é calculada a declividade, a direção de fluxo e a quantidade de fluxo que se acumulou a montante dele. Desta forma, o fator L revisado é obtido pela equação 16:

$$L_{i,j} = \frac{[(A_{i,j-in} + D^2)^{m+1} - (A_{i,j-in})^{m+1}]}{[D^{m+2}x_{i,j}^m(22,13)^m]}$$

Equação 16

Onde:

$L_{i,j}$ = 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;

m: Coeficiente correlacionado a declividade (s) que assume os valores: 0,5, se $s \geq 5\%$; 0,4, se $3\% \leq s < 3\%$; e 0,2, se $s < 1\%$.

Quanto ao gradiente de declividade S para MDEs, Desmet e Govers (1996) utilizam uma relação bidirecional para cada célula, desenvolvida por Zevenbergen e Thorne (1987), descrita na equação 17:

$$S_{i,j} = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}$$

Equação 17

Em que:

$S_{i,j}$ = Fator de declividade de uma célula com coordenadas (i, j);

S_x = Gradiente de declividade no eixo x (m/m)

S_y = Gradiente de declividade no eixo y (m/m)

Uma ferramenta desenvolvida por Conrad (2013) para o SIG SAGAGIS (*System for Automated Geoscientific Analyses*) realiza o cálculo do fator LS com os parâmetros de Desmet e Govers (1996), demandando apenas como parâmetro de entrada o MDE de uma dada área. Ele calcula a área de contribuição do fator $L_{i,j}$ a partir do fluxo divergente de escoamento que se aplica sobre o terreno desenvolvido por Freeman (1991).

3.1.4) Fator uso e manejo do solo (C)

É definido pela quantidade de solos perdida em uma área com cobertura vegetal em relação a uma descoberta, quando ambas são mantidas sob as mesmas condições ambientais (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

As perdas de solo ocorridas em áreas continuamente descobertas podem ser estimadas pelo produto dos fatores R, K e LS, e é chamada potencial natural de erosão. Isto é, considera-se que nestas áreas o fator C é igual a 1 e apenas as características físicas atuarão sobre o terreno. Por outro lado, na condição ideal de cobertura vegetal máxima, seu valor será nulo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

Gameiro (1997) avalia que os efeitos das variáveis uso e manejo não podem ser avaliados independentemente por haver diversas interações entre as duas. Segundo ele:

[...] uma cultura pode ser plantada continuamente em um mesmo local ou então em rotação com outras. Seus restos podem ser removidos, deixados

na superfície, incorporados próximo à superfície ou totalmente enterrados com o preparo do solo. Quando deixados na superfície, podem ser cortados ou mantidos como foram colhidos. O preparo do solo pode deixar a superfície do terreno bastante irregular ou lisa. Considerando as diferentes combinações dessas variáveis, o efeito será diferenciado nas perdas de solo. (GAMEIRO, 1997 p. 16-17)

O levantamento do fator C é realizado de maneira empírica e possui unidade adimensional. Wischmeier e Smith (1978) o calcularam para mais de 10.000 parcelas naturais controláveis, que foram expostas a chuvas naturais e com dados adicionais de pesquisas realizadas com chuva simulada. Em tais parcelas foram testadas as relações entre fatores como: tipo de vegetação, população, desenvolvimento, época do ano e manejo cultural e como eles se relacionam ante a fração erosividade das chuvas em cada época do ano.

Também é possível estimar o fator C de maneira indireta a partir de imagens de satélite obtidas por sensoriamento remoto nas bandas do vermelho e infravermelho através de uma correlação deste fator com o índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*, Índice Normalizado de Diferença Vegetal), baseando-se na resposta das plantas cuja reflectância foliar é mais acentuada na faixa do infravermelho próximo, possibilitando avaliar as mudanças observadas na cobertura vegetal e distinguir diferentes tipos de cobertura do solo (KARABURUN, 2010; PORTZ; GUASSELLI; CORRÊA, 2012).

Para diversas situações, o valor do fator de uso e manejo do solo pode ser obtido em múltiplos trabalhos empíricos desenvolvidos em território brasileiro (SILVA, *et al.*, 2010; FARINASSO *et al.* 2006; TOMAZONI; GUIMARÃES, 2005; PROCHNOW *et al.*, 2005).

3.1.5) Fator Prática Conservacionista (P)

É caracterizado como a relação entre a intensidade esperada de perdas de solo de uma prática qualquer e o cultivo morro abaixo, com escala de variação entre 0 e 1 (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990). Alguns dos valores desse fator para práticas conservacionistas mais costumeiras estão listados na tabela 3.

TABELA 3: VALOR DE P DA EUPS PARA ALGUMAS PRÁTICAS CONSERVACIONISTAS

Prática Conservacionista	P (adimensional)
Plantio morro abaixo	1,0
Plantio em contorno	0,5
Alternância de capinas + plantio em contorno	0,4
Cordões de vegetação permanente	0,2

Fonte: Bertoni e Lombardi Neto (1990)

Wischmeier e Smith (1978) classificaram as práticas de conservação de acordo com as classes de declividade (Tabela 4). Há uma relação de proporcionalidade entre o declive e o valor de P, isto é, quando um dos dois fatores aumenta, o outro também apresenta incremento. As declividades entre 21 e 25% possuem valores de P muito próximos ao cultivo morro abaixo.

TABELA 4: VALORES DE P EM FUNÇÃO DO DECLIVE PARA A PRÁTICA DE PLANTIO EM CONTORNO E LIMITES MÁXIMOS PARA COMPRIMENTO DE RAMPA (OU ENCOSTA)

Declividade (%)	P (Adimensional)	Comprimento máximo (m)
1 a 2	0,60	121,92
3 a 5	0,50	91,44
6 a 8	0,50	60,96
9 a 12	0,60	36,57
13 a 16	0,70	24,38
17 a 20	0,80	18,29
21 a 25	0,90	15,24

Fonte: Wischmeier e Smith (1978)

Diversos estudos realizados no Brasil (RANIERI, 2000; WEILL 1999; RIBEIRO, 2006; CHECCHIA, 2005) adotam a metodologia de Bertoni e Lombardi Neto (1990), elegendo apenas os valores de P para plantio em contorno ou desconsiderando esse fator, uma vez que, embora haja o emprego de outras práticas conservacionistas em cultivos locais, tal prática ainda não é a regra.

3.4) Sistemas de Informação Geográfica

O termo Sistemas de Informações Geográficas pode ser definido como “Um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados” (ARONOFF, apud CÂMARA, 1995, p.6). Eles podem ser utilizados de pelo menos três grandes maneiras: como tecnologia de gerenciamento de uma base de dados geográficos, como suporte para análise espacial de fenômenos ou como ferramenta para produção cartográfica (CÂMARA, 1995).

Os primeiros SIG surgiram no Canadá e Estados Unidos na década de 1960, sendo um projeto governamental de inventário de recursos naturais, limitado pelas restrições computacionais da época a grandes centros de pesquisa que possuíam condições financeiras para investir nesse tipo de tecnologia. Com a evolução da informática a partir da década de 1980 até os dias contemporâneos, o processamento de dados georreferenciados se democratizou, com crescimento da penetração do GIS nas organizações, alavancado pela diminuição de custos de *hardware* e *software* e pelo surgimento de alternativas menos custosas para a construção de bases de dados geográficas (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001)

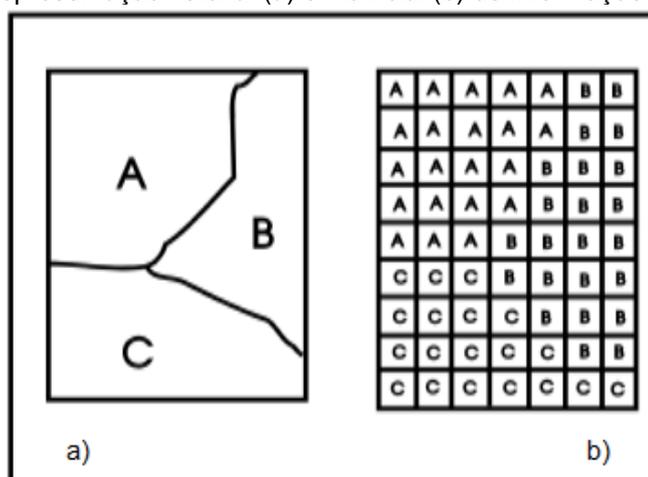
Nos dias atuais, com o acesso ainda mais amplo à internet, existe grande acessibilidade do SIG para diversas formas de usos e inúmeros usuários, o que possibilita uma maior popularização da ferramenta, que tem sido utilizada para estudos e pesquisas em múltiplas áreas do conhecimento, como estudos sociais, econômicos, populacionais, comerciais, de transportes, sensoriamento remoto, hidrológicos, geológicos, entre outros (POLONI, 2010).

Os SIG armazenam a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados em duas formas: vetorial e matricial (ou *raster*). Na representação vetorial, os dados podem se apresentar, dependendo da escala do mapa e do tipo de informação geográfica, através de três entidades: ponto, linha e polígono. Na representação matricial, os dados se apresentam na forma de uma malha quadriculada regular, em que cada célula contém uma informação acerca do fenômeno estudado, em que o espaço pode ser tratado como uma superfície plana em que cada partícula (*pixel*) representa uma infinitésima porção do terreno. A resolução dessa representação é

dada pela relação entre o tamanho da célula e a área coberta no terreno. Quanto menor tamanho das células, mais amplas serão a resolução espacial e a precisão da informação, além do tamanho do arquivo a ser armazenado (CÂMARA; DAVIS; MONTEIRO, 2001).

A escolha entre a representação matricial e a vetorial para um mapa depende do objetivo em vista. Para a produção de cartas e em operações onde se requer maior precisão, a representação vetorial é mais adequada. Já as operações de álgebra de mapas² são mais facilmente realizadas no formato matricial. Na figura 6 são apresentadas as duas formas de representação.

Figura 6: Representação vetorial (a) e matricial (b) de informações geográficas



Fonte: Adaptado de Câmara (1995)

A utilização de SIG para tratamento de dados sobre erosão tem sido aplicada para análise quantitativa ou qualitativa de dados em virtude da facilidade de se manipular e analisar dados espaciais e por possibilitar aos usuários a identificação de áreas mais favoráveis a erodir em pequenas escalas, uma vez que os experimentos com parcelas

² Álgebra de mapas é entendida por Barbosa (2016) como “A combinação de dados *raster* feita célula a célula, resultando em um grande conjunto de funções locais e de vizinhança e em um conjunto locais e de vizinhança e em um conjunto menor de funções globais para dados *raster*” e “Os conjuntos de dados *raster* podem ser combinados através de operações, tais como: adição, subtração e multiplicação”.

demandam a presença *in loco* e monitoramento constantes e representam apenas uma pequena área dos ambientes estudados.

4) ÁREA DE ESTUDO

4.1) Localização geográfica e histórico

A Bacia hidrográfica do rio Duas Bocas (BHRDB) localiza-se entre os municípios de Cariacica, Viana e Santa Leopoldina, no Estado do Espírito Santo, Brasil, compreendida entre as coordenadas 7764117 e 7756102 S e 356463 e 339675 W (figura 7).

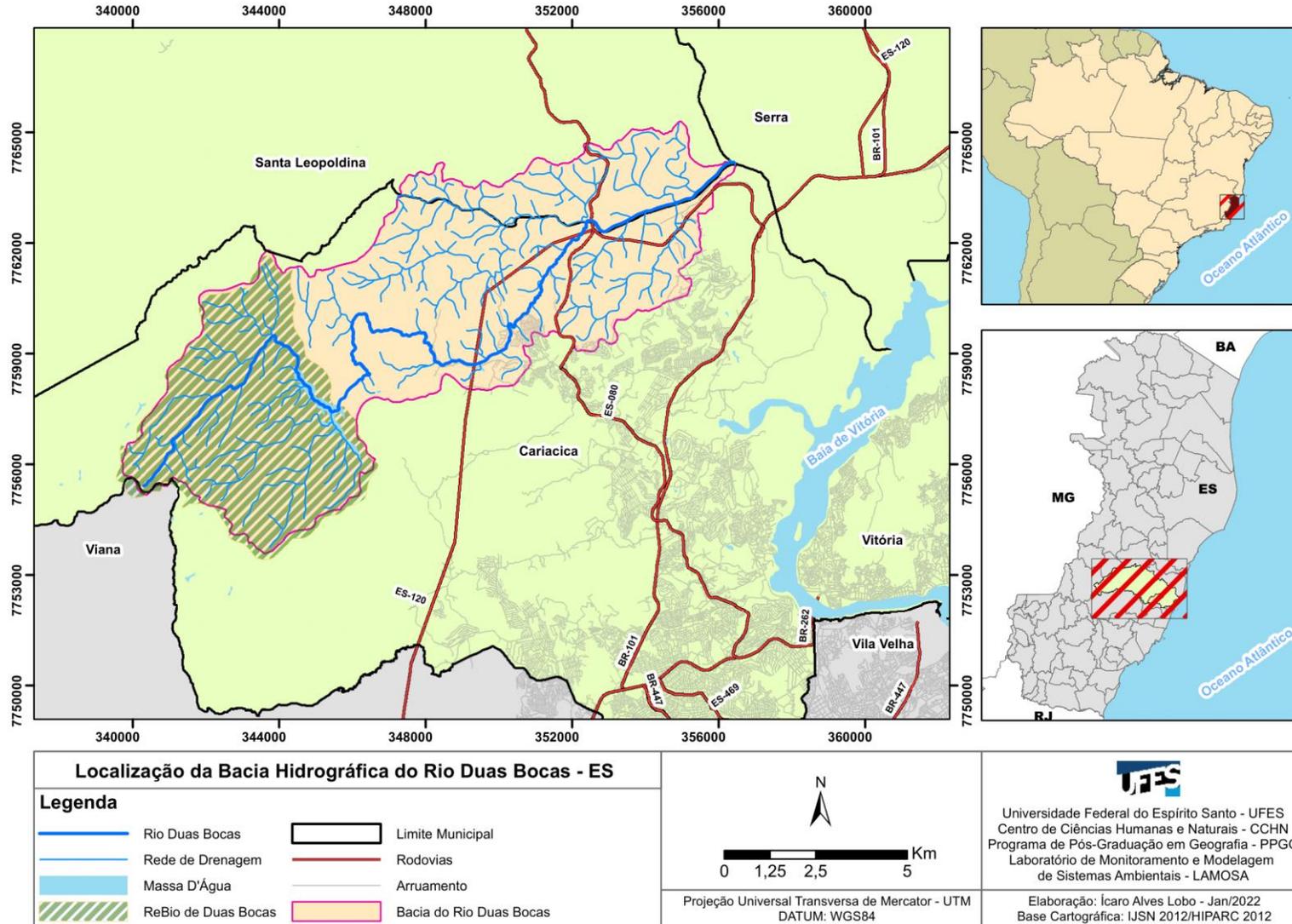
Tal bacia contém uma extensão total de 82,83 km², dos quais 12,25 km² (14,79%) correspondem a Santa Leopoldina, 70,52 km² (85,15%) a Cariacica e 0,05 km² (0,06%) a Viana. A BHRDB é uma sub-bacia do rio Santa Maria da Vitória, um dos principais responsáveis pelo abastecimento de água da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV).

Os principais córregos que constituem a BHRDB são o Pau Amarelo, Naia-Assú, Pannels e Sertão Velho, cujas nascentes encontram-se dentro da Reserva Biológica de Duas Bocas (Rebio) e deságuam no reservatório de Duas Bocas.

A importância da BHRDB para a sociedade, tanto em termos de recursos naturais, como em aspectos de conservação não é recente. Os primeiros registros oficiais de uso e ocupação das terras da área da bacia remontam ao ano de 1854, na forma de sesmarias doadas pelo então regente Dom Pedro II para famílias realizarem a atividade agrícola e a pecuária. A captação de recursos hídricos ocorre desde o ano de 1884, quando o presidente da intendência (prefeito) de Cariacica, Manoel Lopes Loureiro autorizou a construção de um sistema primitivo de captação de água do córrego Pau Amarelo para o abastecimento de Cariacica Sede. (NOVELLI, 2010; BONI, 2012).

Destaca-se a presença da Rebio de Duas Bocas na parte ocidental da bacia. Com 2.910 hectares de área, ela sempre esteve fortemente vinculada à preservação dos recursos hídricos locais. Foi inicialmente criada como Reserva Florestal através da Lei nº 2.095, de 12 de janeiro de 1965 e redefinida a sua categoria de manejo para Reserva Biológica por meio da Lei nº 4.503 de 02 de janeiro de 1991 (NOVELLI, 2010).

Figura 7: Localização da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas entre os municípios de Cariacica, Santa Leopoldina e Viana, Espírito Santo, Brasil.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

Sua vegetação de Mata Atlântica de Encosta (Floresta Ombrófila Densa Submontana) atua como fronteira limítrofe da expansão agrícola (cultivos de banana e café) e da pecuária (bovina extensiva) na região.

Dentro da Rebio encontra-se a Represa de Duas Bocas, construída entre os anos de 1949 e 1954 e que fora inaugurada pelo então Presidente da República Getúlio Vargas. Com área de 50 hectares e profundidade máxima de 10 metros, o reservatório capta águas que são tratadas pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN) que são destinadas majoritariamente ao abastecimento doméstico (FERNANDES *et al.*, 2005).

Desde a criação da Rebio, houve a necessidade do aumento do controle do uso e ocupação da terra em suas adjacências, visando impedir o avanço da urbanização do município de Cariacica, o terceiro mais populoso do Espírito Santo com 348.738 residentes (IBGE, 2010) em direção às Áreas de Preservação Permanente (APP) (SANTOS, 2016), visando não apenas a proteção das nascentes e córregos enquanto fontes de água, pois o volume armazenado na Represa de Duas Bocas supre a necessidade de 25% do município de Cariacica, aproximadamente (NOVELLI, 2010), mas também a da biodiversidade local.

Além de todos os benefícios previamente descritos, a presença da ReBio e da preservação de sua cobertura florestal é demasiado importante para a manutenção do equilíbrio dos fluxos de energia e matéria, visando evitar o desencadeamento dos processos erosivos e transporte sedimentar que ocorrem em vertentes íngremes, além da ação eólica, da pluviosidade, do intemperismo químico e de outros processos físicos que agem sobre o solo. No entanto, a relação existente entre os tributários com seus fluxos determina um equilíbrio entre a descarga líquida e o transporte sedimentar, o que mantém um ritmo proporcional entre ambos desde a nascente até o exutório (CUNHA, 1994 apud PERRONE, 1995).

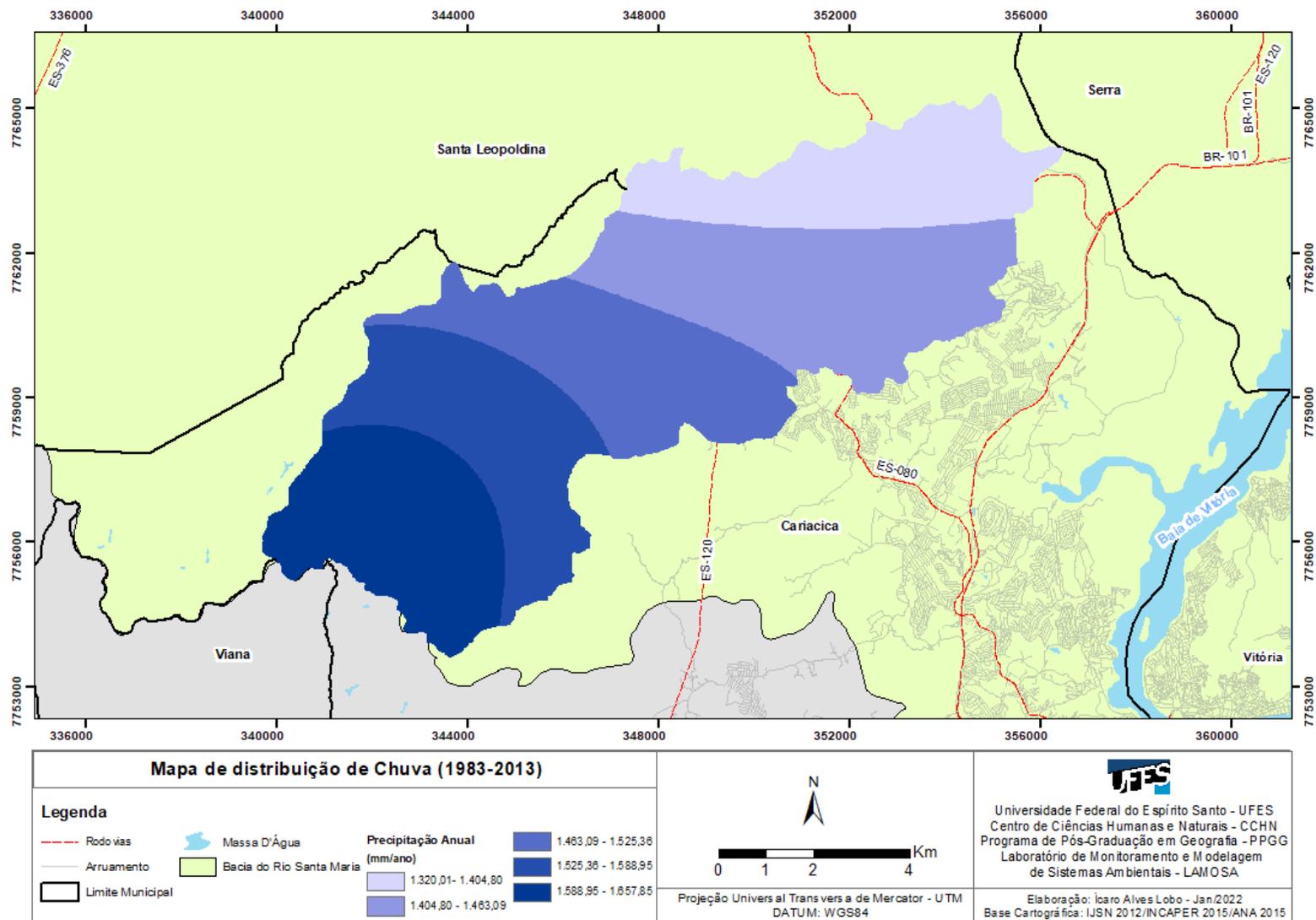
4.2) Aspectos climáticos

O município de Cariacica, que detém a maior parte da área total da BHRDB, possui clima tropical chuvoso, segundo a classificação de Köppen, o que indica elevadas médias pluviométricas, especialmente no verão, juntamente com temperaturas elevadas (OLIVEIRA FILHO, 2010). Sua temperatura média anual é de 24° C, podendo chegar a 33° C nos meses mais quentes.

Em termos pluviométricos, Bastos *et al.* (2015) indicaram que na BHRDB, a precipitação média anual para a normal climatológica entre 1983 e 2013 varia de 1307mm a 1657mm ao longo da área da bacia, um fenômeno que ocorre em função da altitude (efeito orográfico) e que favorece o aumento dos totais pluviométricos acumulados a barlavento nos pontos mais elevados.

Na Figura 8 estão apresentadas as cinco zonas de distribuição de precipitação média anual da BHRDB, obtidas a partir da interpolação de dados pluviométricos de estações da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Capixaba de Pesquisa e Extensão Rural (INCAPER) por Bastos e outros. (2015).

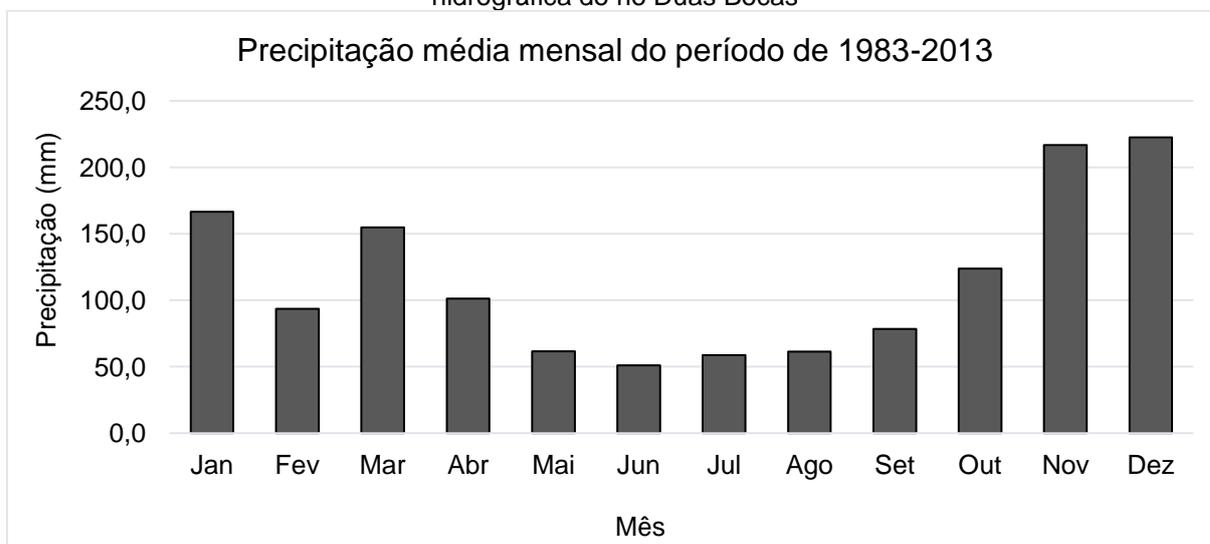
Figura 8: Distribuição média anual (1983-2013) das chuvas na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas



Fonte: Elaborado pelo autor, com base nos dados de Bastos *et al.* (2015)

No intervalo compreendido entre 1983 e 2013, os meses de maiores índices pluviométricos foram novembro, dezembro e janeiro, acumulando média de 605,90 mm ou 44% do total anual, enquanto que os meses menos chuvosos estão no intervalo entre maio e agosto, entre o meio do outono e o inverno, com um total acumulado médio de 232,70 mm, equivalendo a 16% da precipitação a cada 12 meses (BASTOS *et al.*, 2015). A figura 9 exibe o gráfico de média mensal pluviométrica para a série histórica estudada.

Figura 9: Distribuição média mensal da precipitação para o período entre 1983-2013 na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas



Fonte: Adaptado de Bastos *et al.*, 2015

Quanto aos fatores climáticos atmosféricos, diversos estudos (MARCHIORO, 2012; MARCHIORO; KERCKHOFF; LORENA, 2016; CORREA, 2014) apontam que, entre os sistemas dinâmicos que afetam a dinâmica da chuva de maneira direta na região de Vitória/ES, incluindo a área de estudo, estão a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), a Zona de Convergência de Umidade (ZCOU), as massas de ar e a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS).

4.3) Aspectos Geomorfológicos

Com base no mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo realizado pelo Projeto RADAMBRASIL nos anos de 1983 e 1987 na escala 1:250.000, a BHRDB apresenta as seguintes unidades geomorfológicas: Patamares Escalonados do Sul Capixaba, Colinas e Maciços Costeiros, e Planícies Costeiras, Estuários e Praias, que são descritas a seguir:

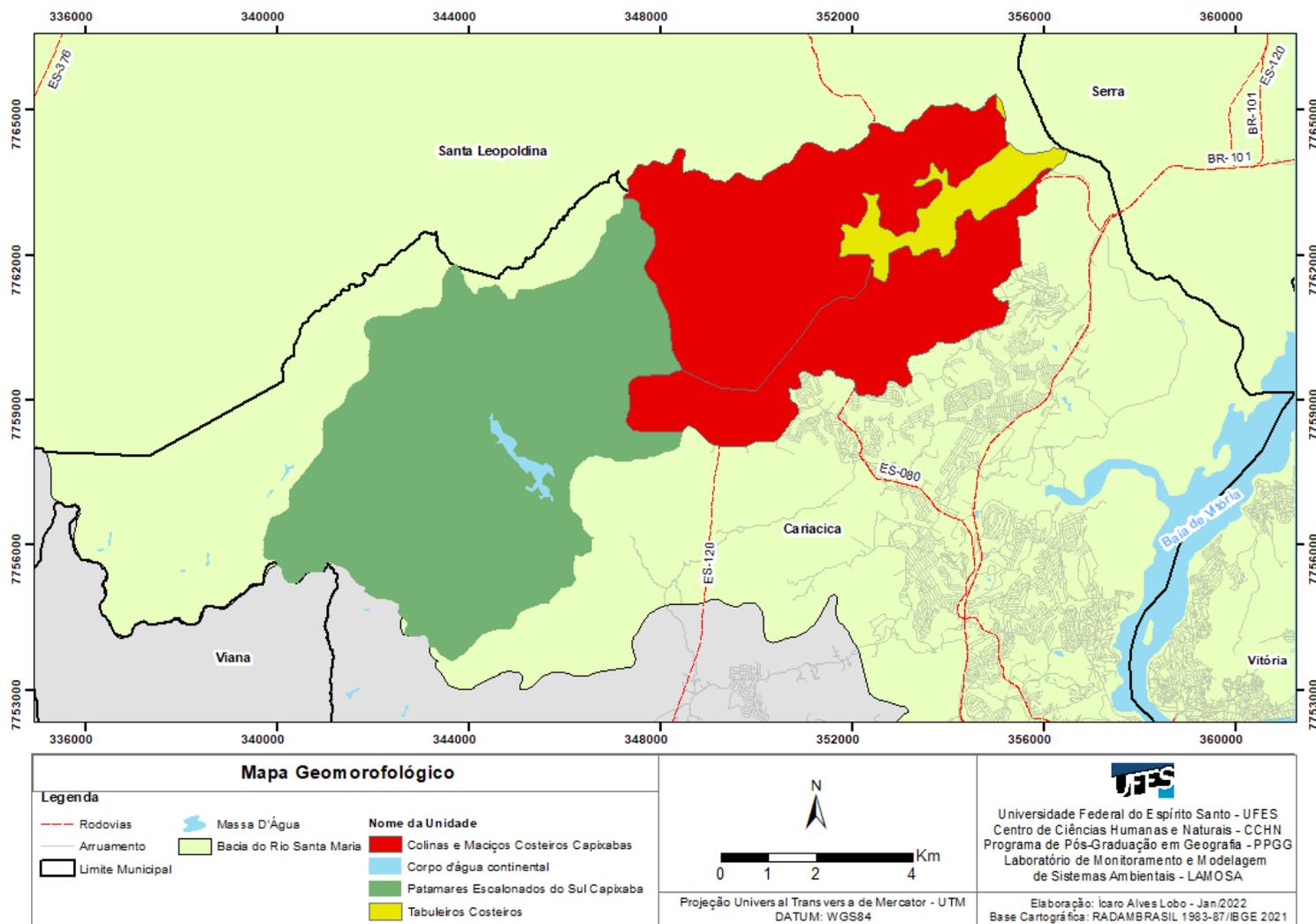
Patamares Escalonados do Sul Capixaba – apresentam níveis de dissecação escalonados que originam patamares, delimitados por frentes escarpadas adaptadas a falhas no sentido noroeste e com caimento topográfico para sudeste, formando blocos basculhados em decorrência de impulsos epirogenéticos relacionados com a atuação dos ciclos geotectônicos (IJSN, 2012).

Colinas e Maciços Costeiros – apresentam um relevo moderadamente dissecado, com baixos patamares altimétricos em relação a outras unidades, refletindo num controle estrutural fraturado e dobrado (IJSN, 2012).

Planícies Costeiras, Estuários e Praias – distribui-se irregularmente entre o Oceano Atlântico e os Tabuleiros Costeiros englobando faixas de praias e as desembocaduras dos rios que se dirigem ao litoral. Sua fisionomia se deve a ação combinada das correntes marinhas paralelas à costa, aos aportes fluviais e às ações eólicas, variáveis de acordo com as modificações climáticas. (IJSN, 2012)

A Figura 10, exibida a seguir, dispõe a distribuição geográfica de cada uma dessas classes na área de estudos.

Figura 10: Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas



Fonte: Elaborado pelo autor

4.4) Aspectos Pedológicos

Conforme reclassificação de 2013 do mapeamento Pedológico da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa realizado em 1978, disponível na escala 1:400.000, na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas estão presentes cinco classes de solo. Adiante, são apresentadas as caracterizações das classes de solos de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013).

CAMBISSOLOS HÁPLICOS – Solos constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, identificados normalmente em relevos forte ondulados ou montanhosos, que não apresentam horizonte superficial A Húmico.

GLEISSOLOS HÁPLICOS – são solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50 cm a partir da superfície do solo, ou a profundidade maior que 50 cm e menor ou igual a 150 cm desde que imediatamente abaixo de horizonte A ou E ou de horizonte hístico com espessura insuficiente para definir a classe dos Organossolos. Não apresentam horizonte vértico em posição diagnóstica para Vertissolos ou textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade de 150 cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico ou lítico fragmentário. Estão associados normalmente com os Gleissolos Melânicos ou com as classes dos Organossolos situando-se nas partes relativamente mais baixas da planície aluvial.

LATOSSOLOS AMARELOS (LA) – Solos desenvolvidos de materiais argilosos ou areno-argilosos sedimentares da formação Barreiras na região litorânea do Brasil. A cor amarelada é uniforme em profundidade, o mesmo ocorrendo com o teor de argila. A textura mais comum é a argilosa ou muito argilosa. Outro aspecto de campo refere-se à elevada coesão dos agregados estruturais (solos coesos). Apresentam boas condições físicas de retenção de umidade e boa permeabilidade, sendo intensivamente utilizados para culturas de cana-de-açúcar e pastagens. Sua ocorrência é associada ao relevo plano ou suavemente ondulado.

Associação do LATOSSOLO AMARELO e CAMBISSOLO – possui característica de ambas as classes, isto é, solos constituídos por material mineral com horizonte B

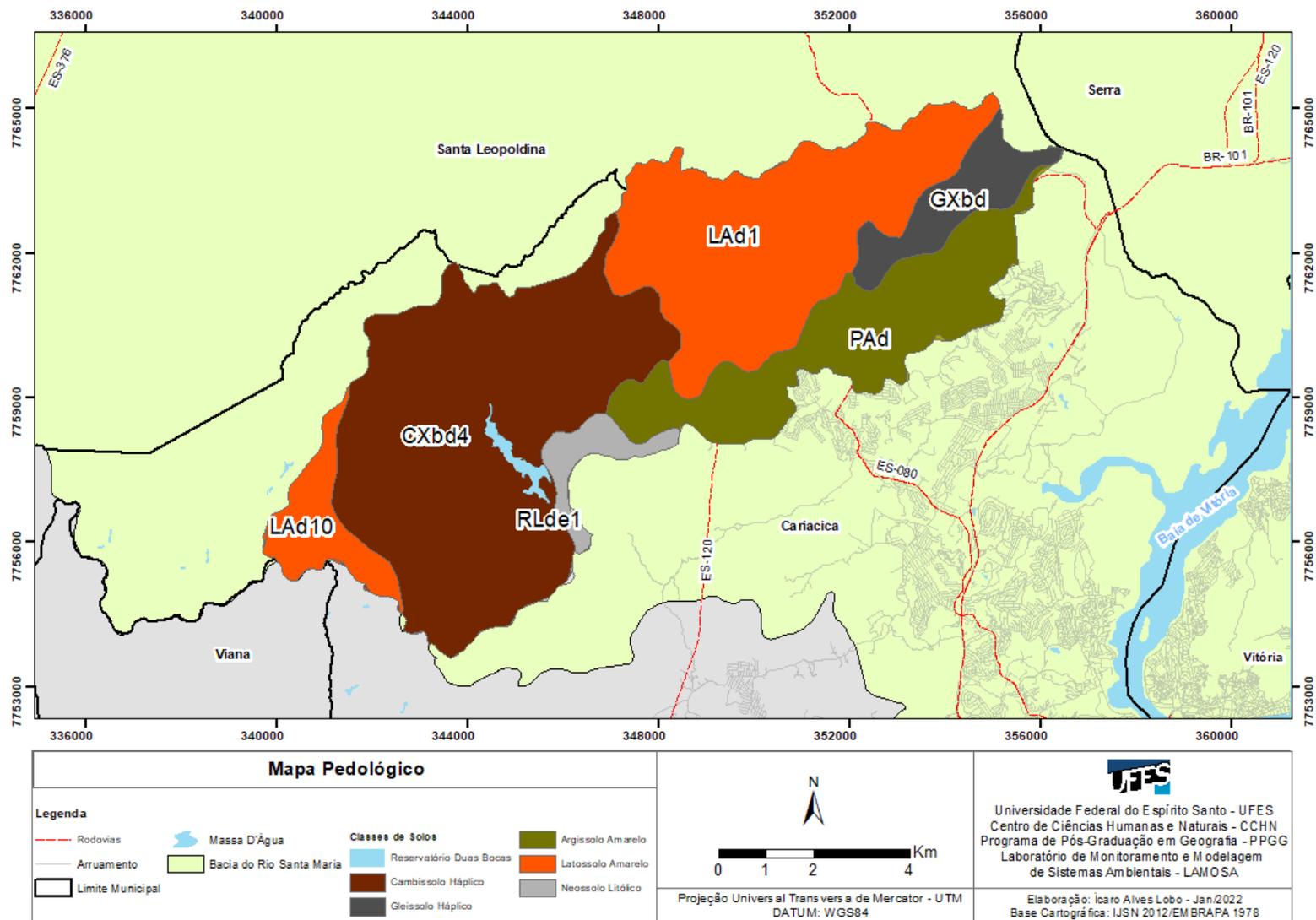
incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial, identificados normalmente em relevos forte ondulados ou montanhosos, neste caso, o horizonte superficial sendo extremamente arenoso, de coloração amarelada e com boas capacidades de retenção da umidade e permeabilidade.

ARGISSOLOS AMARELOS – são solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta desde que conjugada com saturação por bases baixa ou com caráter alumínico na maior parte do horizonte B. São originados principalmente de materiais argilosos ou areno-argilosos sedimentares da formação Barreiras na região litorânea do Brasil. Apresentam boas condições físicas de retenção de umidade e boa permeabilidade, porém, baixa fertilidade.

NEOSSOLOS LITÓLICOS – São solos pouco evoluídos, constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura, não apresentando nenhum tipo de horizonte B diagnóstico. Compreendem solos rasos, onde geralmente a soma dos horizontes sobre a rocha não ultrapassa 50 cm, estando associados normalmente a relevos mais declivosos.

A seguir, estão apresentadas a distribuição classes de solo na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas (Figura 11)

Figura 11: Mapa de classes de solos da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5) Aspectos hidrogeográficos

O rio Duas Bocas apresenta pequenos tributários, cujas nascentes encontram-se conservadas sob cobertura vegetal no maciço homônimo e localizam-se a uma altitude média de 750m. As cabeceiras dos principais córregos situam-se dentro da área da ReBio de Duas Bocas, sendo os mais notórios: Pau-Amarelo, Naia-Assú, Painelas e Sertão Velho (MARCHIORO, 1996; PERRONE, 1995; BARROSO; MARCHIORO, 1999).

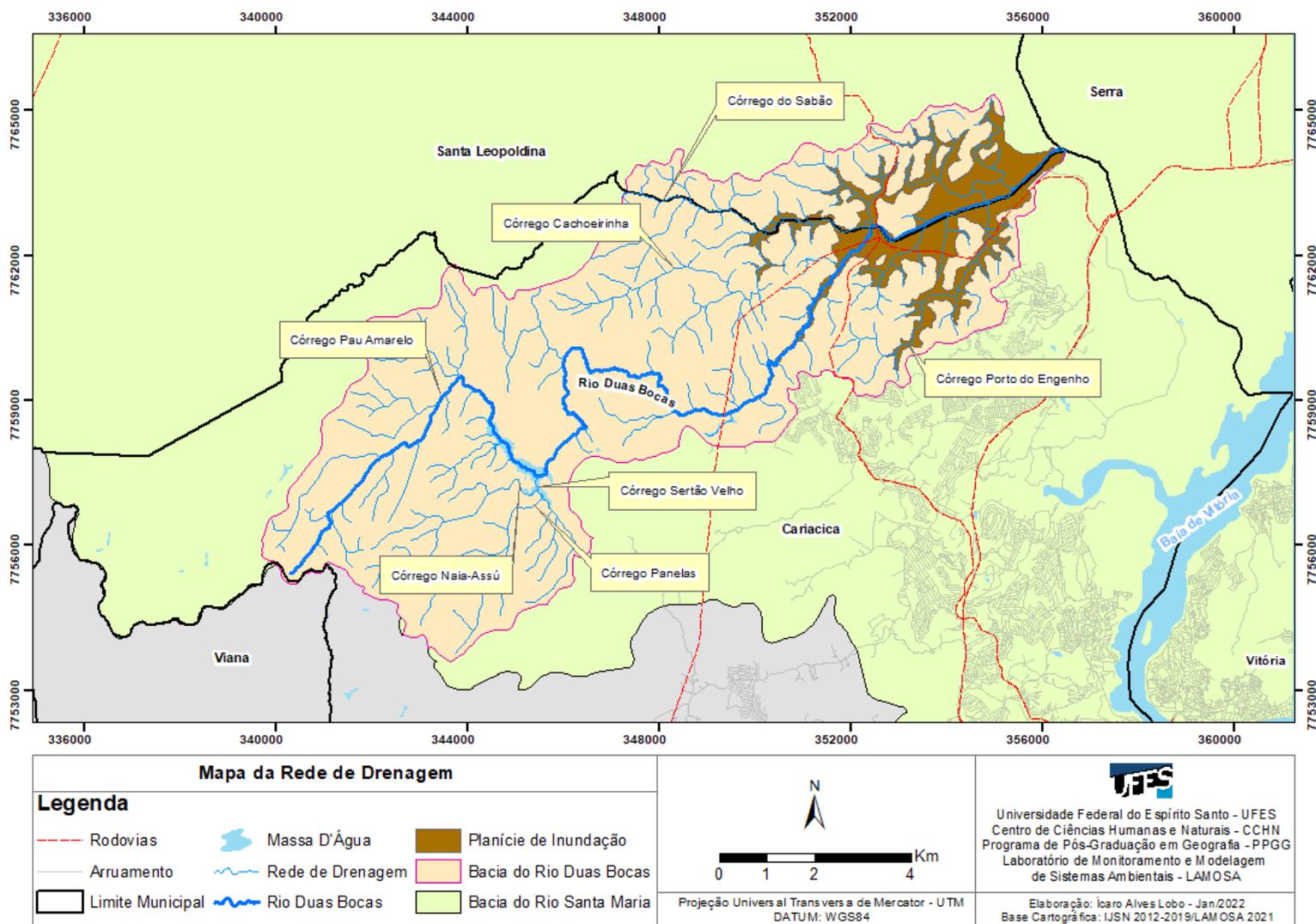
De acordo com Perrone (1995), o córrego Pau-Amarelo é o canal principal, sendo o maior contribuinte do volume hídrico que chega ao Rio Duas Bocas e ao reservatório, com uma vazão média de 137,5 l/s. Cupertino (2018) confirmou que, dentre os três córregos que nutrem o volume represado pela barragem de Duas Bocas, o Pau Amarelo é o que mais contribuiu tanto em vazão média (34 l/s) quanto em aporte sedimentar entre os anos de 2015 e 2016. Em períodos de cheias, a vazão registrada chegou a ser de 1400 l/s (SOUZA; SILVA; MARCHIORO, 2018).

Por sua vez, o córrego Naia-Assú também se destaca em termos de volume escoado para o Rio Duas Bocas, com uma vazão média entre 20 e 50 l/s (MARCHIORO, 1996).

Outros córregos que constituem a rede de drenagem da BHRDB são: Córrego do Sabão, Cachoeirinha, Porto do Engenho, da Manteiga, Taquaraçu, Andorinha, Retiro, Pau-Oco, Freiro do Burro, Batinga, entre outros. (Figura 12)

O Rio Duas Bocas, após percorrer uma região de relevo com declividades significativas, encontra-se com o Córrego do Sabão, originando uma planície fluvial até sua confluência com o Rio Santa Maria da Vitória (PERRONE, 1995).

Figura 12: Hidrografia da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6) Aspectos Geológicos

As unidades geológicas presentes na área de estudo, segundo o mapeamento realizado pela CPRM no ano de 2019 são: Complexo Nova Venécia, Formação Barreiras, Granito Espírito Santo, Depósitos Coluvionares Inconsolidados e Depósitos Aluvionares. A seguir, estão descritas as características de tais unidades.

O *Complexo Nova Venécia* – tem formação majoritária de migmatito paraderivado, com composição geralmente peraluminosa, o que evidencia altos teores de biotita, granda, cordierita, sillimanita e/ou hercynita. Também apresenta bandamento composicional formado por migmatítico, o que é evidenciado pela presença de lentes de rocha calcissilicática, com a foliação regional e paralela ao bandamento composicional. Geralmente afloram em lajedos e nos leitos dos principais cursos d'água (QUEIROGA *et al.*, 2012).

A *Formação Barreiras* – representa a cobertura sedimentar sub-horizontal, datada da era cenozoica. Em sua constituição constam arenito conglomerático, arenito com lentes conglomeráticas e canga. Contudo, a maior presença é do arenito conglomerático composto por grãos de quartzo angulosos, de baixa esfericidade e granulometria variando entre areia fina a grânulo, em meio a uma matriz argilo-siltosa (QUEIROGA *et al.*, 2012).

O *Granito Espírito Santo* – é definido como granitoide quimicamente indiferenciado, pós-colisional e está intrudido em litótipos carbonáticos e terrígenos. Sua composição é de hornblenda-biotita granodiotio porfirítico com matriz cinza claro de grã média (CPRM, 2006).

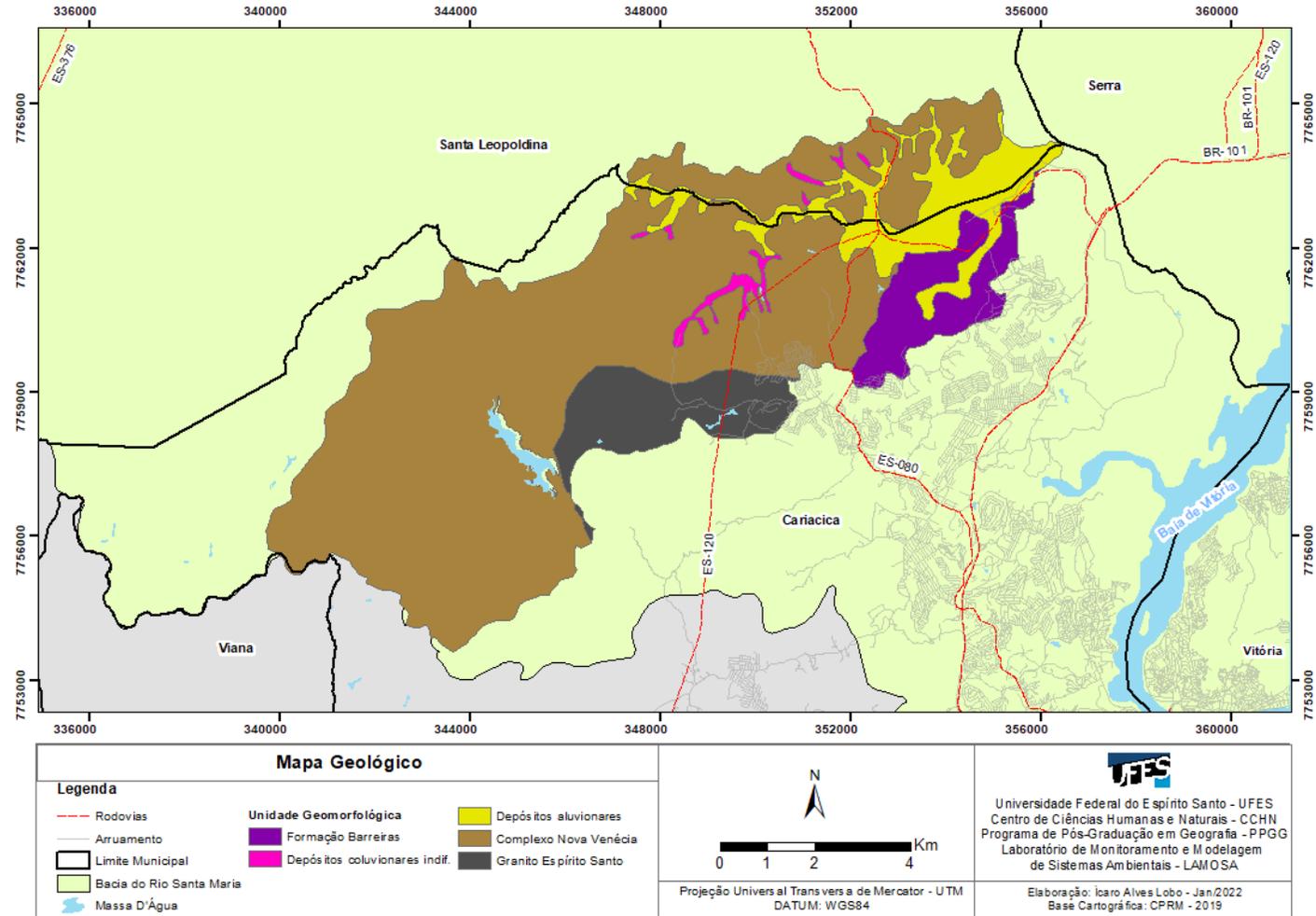
Os *Depósitos Coluvionares Inconsolidados* – são compostos por materiais de grande variabilidade de textura e rede de fluxo bem estabelecida nos períodos chuvosos, transportados por gravidade e acumulados no sopé ou a uma curta distância dos taludes mais íngremes ou escarpas rochosas (LACERDA; SANDRONI, 1985)

Os *Depósitos Aluvionares* – correspondem aos sedimentos transportados pelos rios e afloram nas áreas marginais dos cursos d'água que drenam a planície costeira e se

interligam às lagoas, em contato com os depósitos eólico pleistocênico, paludial, lagunar, eólico holocênico e eólico recobrindo depósito marinho praial (BRASIL, 1983)

A Figura 13 exhibe a disposição das unidades geológicas ao longo da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas.

Figura 13: Hidrografia da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas

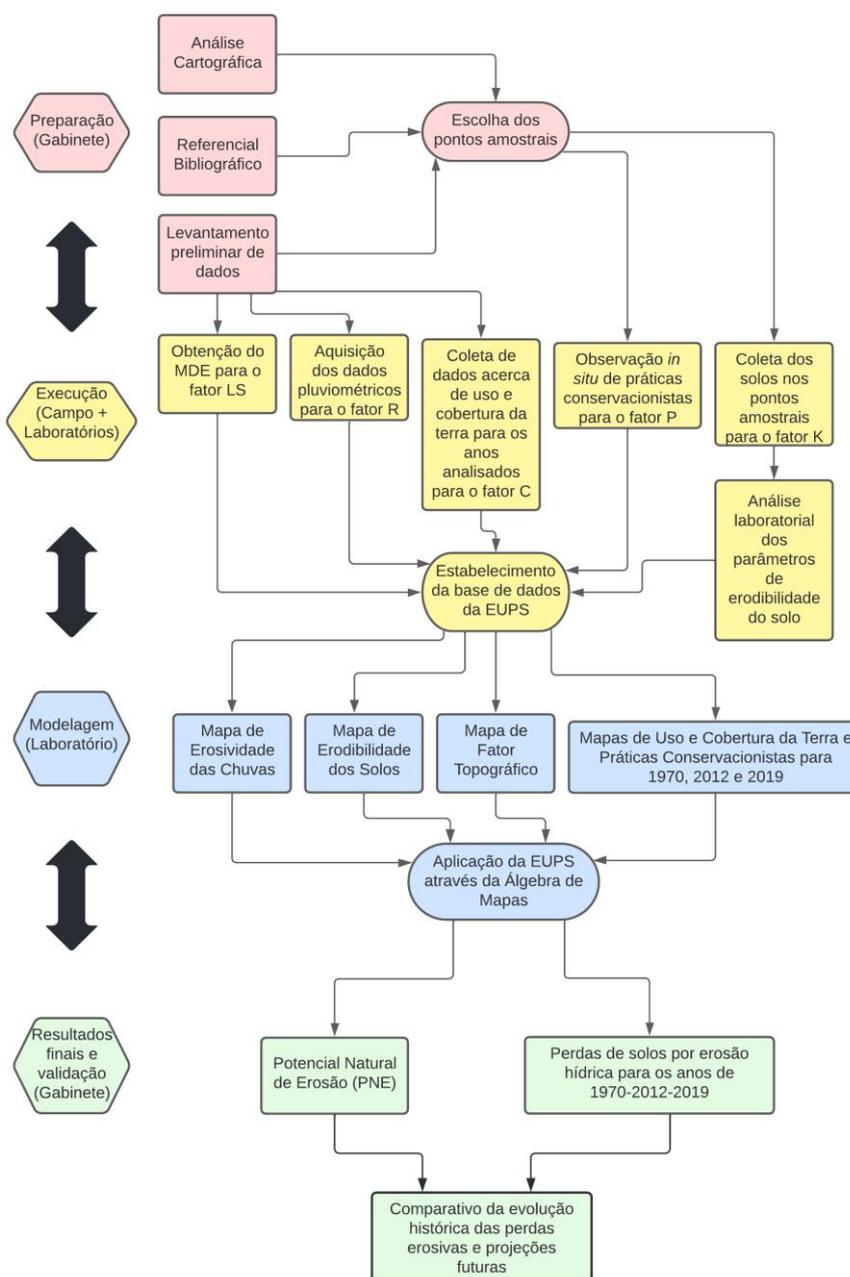


Fonte: Elaborado pelo autor

5) MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa, são apresentados os materiais e métodos, precedidos de um fluxograma (Figura 14) para compreensão dos caminhos para o desenvolvimento deste trabalho.

Figura 14: Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas (ES).



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1) Estágio de Preparação

Nesse estágio, o trabalho ocorreu em escritório, com três etapas: referencial bibliográfica, análise cartográfica e levantamento preliminar de dados.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica envolvendo a temática erosão e perda de solos, em periódicos nacionais e internacionais, bem como, teses e dissertações e capítulos de livros, visando conhecer todo o processo envolvido nos parâmetros e na modelagem da EUPS, a fim de subsidiar a tomada de decisões ao longo da construção da dissertação.

Na análise cartográfica da área de estudo, feita a partir dos trabalhos de Bastos (2015) e Santos (2016), buscou-se compreender os aspectos pedológico e de uso e cobertura da terra da Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas, além das condições de relevo e declividade.

O levantamento preliminar de dados, por sua vez, fora realizado tendo em vista a viabilidade de obtenção das demais variáveis empíricas necessárias para a execução da modelagem³, assegurando a factibilidade da pesquisa. Tal etapa ocorreria a partir de consultas em bases de dados⁴ públicas governamentais, e privadas, quando disponibilizadas ao Laboratório de Monitoramento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LAMOSA) de maneira gratuita.

Por fim, a partir do amparo dessas etapas, foram selecionadas as possíveis zonas de coleta de solos *in loco* para o cálculo da erodibilidade dos solos presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas, almejando contemplar a pluralidade de solos, de uso e cobertura da terra e a observação de práticas conservacionistas durante os trabalhos de campo, com os trabalhos de campo ocorrendo durante o segundo semestre do ano de 2019.

³ Dados referentes à precipitação média anual nas estações pluviométricas e valores tabelados dos fatores de uso e cobertura da terra e de práticas conservacionistas para alimentar a EUPS.

⁴ As bases de dados consultadas que foram utilizadas nesta pesquisa serão elencadas nas seções referentes as suas respectivas etapas de processamento de dados.

5.2) Estágio de Execução

Nesta seção estão descritos os procedimentos metodológicos de obtenção da base de dados necessária para o cálculo da Equação Universal da Perda de Solos, sendo estes:

- Erosividade das chuvas (R): Obtida a partir da **tabulação da série histórica** de 30 anos de chuvas de Bastos (2015).
- Erodibilidade dos solos (K): Obtida a partir de dados de **análise laboratorial** físico-química dos **solos coletados *in situ*** e dos cálculos da metodologia indireta de Sharpley e Williams (1990).
- Fator topográfico (LS): Obtido a partir de **Modelo Digital de Elevação** fornecido pela empresa HIPARC (2012)⁵ e conversão por algoritmo de Desmet e Govers (1996) em ambiente SIG SAGAGIS.
- Fator uso e manejo do solo (C): Obtido a partir de consulta bibliográfica em trabalhos prévios e espacializado em ambiente SIG ArcMap a partir de **classes temáticas**.
- Fator prática conservacionistas (P): Identificado em trabalhos de campo a partir de **observação *in situ*** e obtido a partir de consulta bibliográfica.

5.2.1) Erosividade das chuvas (R)

Para o cálculo de erosividade das chuvas foi utilizada a equação 8 de Martins *et al.* (2010), que estabelece uma relação linear para a erosividade da precipitação para o município de Aracruz, que está situado a cerca de 90km a nordeste da Bacia

⁵ O MDE foi utilizado em resolução espacial de 5m e foi utilizado por se tratar de uma representação acurada da região de estudos.

Hidrográfica do Rio Duas Bocas. A equação utiliza a série histórica de dados de pluviômetros para a determinação do fator R.

A seguir (Tabela 5) estão listadas as estações pluviométricas que foram utilizadas neste trabalho, sendo estas de responsabilidade da Agência Nacional de Águas (ANA) e do Instituto Capixaba de Pesquisa e Assistência Rural (INCAPER), com os dados obtidos através do Portal HidroWeb⁶. O critério de seleção das estações foi a localização das mesmas, pois encontram-se nas cercanias ou dentro dos limites da Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas. Sempre foi utilizado o intervalo de 30 anos para a série histórica.

TABELA 5: ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS CONSIDERADAS PARA O CÁLCULO DO FATOR R

Responsável	Latitude (S)	Longitude (W)	Normal Climatológica
ANA	349080	7746202	1983-2013
ANA	345027	7741892	1983-2013
ANA	345511	7758901	1983-2013
ANA	362193	7766912	1983-2013
ANA	349115	7772150	1983-2013
ANA	334470	7778482	1983-2013
ANA	340271	7776687	1983-2013
ANA	327439	7752519	1983-2013
ANA	357820	7730867	1983-2013
INCAPER	331966	7778967	1969-1998
INCAPER	324497	7742027	1969-1998
INCAPER	340249	7776720	1969-1998
INCAPER	342323	7746853	1983-2013
INCAPER	362095	7754769	1983-2013
INCAPER	334799	7789068	1983-2013

Fonte: Agência Nacional de Águas (ANA) e Instituto Capixaba de Pesquisa e Assistência Rural (INCAPER)

⁶ Do sítio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (2005): “O Portal HidroWeb é uma ferramenta integrante do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) e oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN), reunindo dados de níveis fluviais, vazões, chuvas, climatologia, qualidade da água e sedimentos.”

Os dados oriundos destas estações pluviométricas foram trabalhados no editor de planilhas Microsoft Excel para cálculo das precipitações médias anuais e de índice de erosividade R para cada estação pluviométrica. A partir desses dados, os valores obtidos foram inseridos na tabela de atributos do *shapefile* de pontos correspondentes a cada uma das estações com o SIG ArcMap™ versão 10.4. Posteriormente, tais pontos foram interpolados através do método *Spline With Barriers*, conforme a metodologia aplicada por Bastos *et al.* (2015).

A partir do mapa de precipitação anual média da região, a equação de Martins *et al.* (2015) foi aplicada graficamente a partir da ferramenta *Raster Calculator (Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator)* do ArcMap™ 10.4, tendo como resultado o mapa de erosividade pelas chuvas para a área de estudo.

5.2.2) Erodibilidade dos solos (K)

A erodibilidade dos solos foi obtida de duas maneiras: a partir dos valores da literatura com base nas classes de solos encontrados na BHRDB, servindo como parâmetro de referência para a região e da coleta de amostras *in situ*, que foram analisadas no Laboratório de Geografia Física da Universidade Federal do Espírito Santo (LGF-Ufes), visando a obtenção da granulometria dos solos e de seu teor de Carbono Orgânico, a fim de se aplicar a metodologia de Sharpley e Williams (1990) e com posterior classificação conforme a escala de Carvalho (1994) quanto ao grau de erodibilidade.

Os resultados obtidos foram exportados para um *shapefile* de distribuição de classes de solos para a área de estudo, em sua tabela de atributos, por meio do SIG ArcMap™ versão 10.4, sendo designado o valor de erodibilidade para cada uma das diferentes classes, que integrou a base de dados necessária para o cálculo da EUPS.

Visando a obtenção dos parâmetros necessários para ambas equações de erodibilidade, foram realizados trabalhos de campo para a coleta de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas e posterior análise laboratorial no Laboratório de Geografia Física (LGF-Ufes), descritas a seguir.

5.2.2.1) Trabalhos de campo

Tomando como referência os mapas de pedologia da Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas, buscou-se realizar a coleta dos solos identificados na região de estudos visando contemplar a maior variedade possível de usos e coberturas, de maneira a representar de forma realista as diversas classes de solos presentes na bacia.

Os trabalhos de campo ocorreram no segundo semestre de 2019, sendo realizados em cinco datas distintas nos meses de julho (duas jornadas), setembro, novembro e dezembro. No total, foram amostrados 39 pontos da BHRDB, com suas coordenadas listadas na tabela 6.

TABELA 6: COORDENADAS DOS PONTOS AMOSTRAIS ONDE FORAM COLETADAS AMOSTRAS DE SOLOS

Nome	Latitude	Longitude
Ponto 01	7760217	351154
Ponto 02	7760219	351058
Ponto 03	7760633	351059
Ponto 04	7760569	351042
Ponto 05	7760501	351120
Ponto 06	7760562	351211
Ponto 07	7760455	350787
Ponto 08	7760037	350810
Ponto 09	7759885	350804
Ponto 10	7759799	350625
Ponto 11	7759750	350622
Ponto 18	7759923	350468
Ponto 19	7759010	350235
Ponto 20	7762164	353815
Ponto 21	7758599	345778
Ponto 22	7758351	345480
Ponto 23	7758367	345815
Ponto 24	7758545	346167
Ponto 25	7759318	350311
Ponto 26	7759408	350254
Ponto 28	7759057	349305
Ponto 29	7759057	349305
Ponto 30	7759526	345987
Ponto 31	7759590	346053
Ponto 32	7758883	346052
Ponto 33	7758784	346093
Ponto 34	7762412	354927

Ponto 35	7755613	341506
Ponto 36	7755739	341395
Ponto 37	7755551	341672
Ponto 38	7757756	345297
Ponto 39	7757847	345128
Ponto 40	7757898	345106
Ponto 41	7758055	346049
Ponto 42	7757987	348119
Ponto 43	7757828	347280
Ponto 44	7762301	353518
Ponto 45	7762836	354151
Ponto 46	7762160	352678

Fonte: Elaborado pelo autor

As coordenadas dos pontos foram obtidas a partir de dispositivos celulares com o sistema operacional *Android* a partir da aplicação *GPS Essentials*, e foram exportadas para o SIG ArcMap™ 10.4, gerando um *shapefile*.

As amostras de solos foram coletadas de maneira indeformada, com cavadeira de ferro, em seu horizonte superficial (0-20cm), uma vez que os efeitos da erosão hídrica auferidos pela EUPS ocorrem essencialmente a partir da desagregação de partículas que se encontram nesta região. A Figura 15 exhibe um exemplo de ponto de coleta de amostra de solo.

Figura 15: Trincheira aberta para coleta de amostra (E) e coleta de solos na BHRDB (D)



Fonte: do autor (2019)

5.2.2.2) Análise laboratorial dos solos coletados in situ

As amostras de solos coletadas na área de estudos foram secas na sala de preparação de amostras do Laboratório de Geografia Física (DGEO/UFES) em temperatura ambiente até atingirem um estado de ausência de umidade. Posteriormente, elas foram destorroadas manualmente em um almofariz de cerâmica para poderem ser processadas em peneiras de 2 mm, a fim de se obter terra fina seca ao ar (TFSA), que passa por um novo processo de secagem, desta vez em estufa, pelo período de 24h a 105°C. As análises laboratoriais subsequentes foram realizadas a partir da TFSA, almejando a obtenção de dois parâmetros descritos a seguir: teor de carbono orgânico (COS) e granulometria. A Figura 16 exhibe as amostras coletadas no primeiro campo antes da etapa de secagem e um dos almofarizes que foi utilizado para a realização da destorroagem dos solos.

Figura 16: Amostras coletadas em campo e almofariz de cerâmica utilizado para destorroar o solo



Fonte: do autor (2019).

Determinação de Carbono Orgânico do Solo

A determinação de Carbono Orgânico do Solo (COS) foi realizada por gravimetria com método adaptado de Embrapa (2018) utilizando TFSA. Desta maneira, as amostras de TFSA são inseridas em cadinhos de porcelana e pesadas (4g). Em seguida, os cadinhos são introduzidos em uma mufla, para sofrerem o processo de combustão

pelo período de 4h, visando a eliminação de todo o Carbono da amostra. Em seguida, as amostras são resfriadas e passam por um novo processo de pesagem, e o COS é determinado a partir do cálculo da diferença entre o peso inicial da TFSA e o peso final, após a combustão. A Figura 17 apresenta as amostras de solos e o equipamento utilizado para a incineração da matéria orgânica.

Figura 17: Amostras de solos após combustão (acima) e mufla utilizada para a queima do carbono (abaixo)



Fonte: do autor (2021).

Análise Granulométrica

A análise granulométrica das amostras foi realizada em duas etapas: dispersão da amostra de solo e quantificação das frações texturais (Granulométricas). A textura (Granulometria) foi determinada conforme Embrapa (2011).

Assim, o processo se inicia com a pesagem de 10g de cada amostra, que em seguida são dissolvidos em 100ml de solução NaOH 0,1M. Em seguida, as amostras passam por processo de agitação lenta, conforme indicações de Ruiz (2005) por um período

de 16h, em um Agitador de Wagner. Posteriormente, as amostras são lavadas com 500ml de água deionizada e passam por uma peneira de malha de 0,5mm, onde as partículas retidas são separadas e classificadas como fração areia. O volume de 500ml, por sua vez, contém as frações silte e argila e passam por dois processos de pipetamento de 25ml: um realizado imediatamente após a coleta da areia, para obtenção de uma mistura silte e argila, e outro após 3:33h, para separação da fração argila, uma vez que esse é o tempo necessário para que as partículas de silte se depositem ao fundo da mistura nas CNTP (1 ATM e 25°C).

Depois de serem distinguidas e coletadas, as três frações de cada amostra passam por um processo de secagem em estufa por 24h a 60°C e, finalmente, são pesadas novamente.

Para a determinação do teor de silte puro, uma vez que sua coleta é feita em associação com argila em suspensão, seu valor final deve ser diminuído da massa específica do dispersante e multiplicado pela proporção entre o volume total de amostra pelo que foi pipetado e posteriormente dividido pelo peso inicial de TFSA. Ruiz (2005).

Os resultados foram interpretados de acordo com Almeida *et al.* (2012), sendo as porcentagens de cada fração colocada no diagrama ternário areia-silte-argila para obtenção da classe textural de cada amostra. Essa metodologia também subsidiou a determinação de parâmetros utilizados para o cálculo do Fator K. A Figura 18 exhibe dois momentos distintos da etapa de análise granulométrica.

Figura 18: Etapa de pesagem (E) e processo de agitação lenta de amostra para granulometria em Agitador de Wagner (D).



Fonte: do autor (2021).

K₃ - Erodibilidade do Solo pelo método indireto de Williams

O cálculo do Fator K é realizado utilizando os percentuais de areia, silte e de argila, além do COS. Assim, após a determinação das frações granulométricas supracitadas foi realizada segundo Embrapa (2011) e Ruiz (2005), sem adaptações, utilizando as equações 11-15.

5.2.2.3) Espacialização da Erodibilidade dos Solos

Tendo os valores de erodibilidade para cada amostra, foi possível estimar os valores de K para as classes de solo de maneira espacializada, utilizando a função *Spline with Barriers* do ArcMap (*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Interpolation > Spline with Barriers*), utilizando como pontos de entrada as coordenadas de referência dos pontos de coleta e delimitando as barreiras do mapa pedológico da região (EMBRAPA, 1978) para cada classe de solo como barreiras para a interpolação, visando apenas a distribuição espacial dos valores de K para os limites internos dos polígonos de cada classificação original. O tamanho de célula utilizado para esse mapa foi de 5cm/pixel.

5.2.3) Fator topográfico (LS)

Para a representação deste fator, é necessária a introdução do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo. Também conhecido como Hipsometria ou Grade Triangular Irregular (TIN), ele representa as altitudes de uma dada área. Para a bacia de Duas Bocas, o MDE foi confeccionado a partir de curvas de nível com equidistância de 5 em 5 metros, fornecidas pela empresa HIPARC Geotecnologia ao Laboratório de Monitoramento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LAMOSA-Ufes). A partir dele, no SIG ArcMap™ versão 10.4, foi utilizada a ferramenta de criação de TIN da extensão ArcMap para a obtenção do Modelo Digital de Elevação.

Posteriormente, o MDE foi exportado para o SAGAGIS. Neste ambiente, o MDE foi introduzido como dado de entrada e, aplicando a função *Module LS Factor* (CONRAD,

2013), que utilizou o algoritmo de Desmet e Govers (1996) para o cálculo de declividade e comprimento de rampa das encostas, substituindo o comprimento de rampa pela área de contribuição específica, o resultado obtido foi uma representação gráfica do produto da declividade pelo comprimento de rampa, indicando de forma adimensional a influência do relevo para a erosão de uma dada região.

O produto final integrou a base de dados que alimentou o modelo EUPS durante o estágio de execução.

5.2.4) Uso e cobertura da terra e práticas conservacionistas (CP)

Para compreender quais os distintos usos e manejos da terra e quais práticas conservacionistas estão presentes na Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas, foram utilizados como referência os mapas de uso e cobertura da terra obtidos a partir do processo de fotointerpretação das imagens obtidas por aerofotolevanteamento para os anos de 1970 e 2008, a serviço do Instituto Estadual do Meio Ambiente do Espírito Santo (IEMA-ES), e por captura de satélite do ano de 2019, a partir dos equipamentos KOMPSAT 3 e KOMPSAT 3A, adquiridas pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente do Espírito Santo. Posteriormente passaram por um novo processo de fotointerpretação, este último realizado pelo autor, visando contemplar as áreas que não estavam representadas nos novos limites da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas. Os valores de C (adimensionais) atribuídos para cada classe de uso e cobertura da terra estão listados na Tabela 7.

Tabela 7: Fator C de acordo com o uso do solo e suas respectivas referências bibliográficas

Uso e Ocupação da terra (1970,2012,2019)	C	Fonte
Afloramento Rochoso	0,0000	Wischmeier e Smith (1978)
Massa d'Água	0,0000	Wischmeier e Smith (1978)
Edificação	0,0000	Wischmeier e Smith (1978)
Brejo	0,0000	Fiorese (2020)
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	0,0007	Costa <i>et al.</i> (2005)
Macega	0,0050	Lombardi Neto (1999) apud Ribeiro (2012)

Pastagem	0,0100	Lombardi Neto (1999) apud Ribeiro (2012)
Mata Nativa	0,0120	Farinasso <i>et al.</i> (2006)
Reflorestamento - Seringueira	0,0200	Kuntchik (1996)
Silvicultura/Reflorestamento Eucalipto	0,0470	Lombardi Neto (1998) apud Poloni (2010)
Jaqueira	0,0500	Vázquez-Fernandez <i>et al.</i> (1996)
Cultivo Agrícola - Banana	0,0870	Lombardi Neto (1999) apud Ribeiro (2012)
Cultivo Agrícola - Cana-De-Açúcar	0,1130	De Maria <i>et. Al</i> (1994)
Cultivo Agrícola – Café	0,1412	Prochnow <i>et al.</i> (2005)
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	0,2000	Fiorese (2020)
Coco Baía	0,2500	Fiorese (2020)
Outros Cultivos Agrícolas Anuais/Permanentes	0,2500	Fiorese (2020)
Outros	0,2500	Wischmeier e Smith (1978)
Extração Mineração	0,3000	Bertolini & Lombardi Neto (1993)
Solo Exposto	1,0000	Wischmeier e Smith (1978)

Fontes: listadas na tabela

Já em relação as práticas conservacionistas, para os usos diagnosticados de Afloramento Rochoso, Massa d'Água, Edificação e Brejo, seus valores foram considerados iguais a 0, pois entende-se que são classes que ora não perdem solos, ora não permitem a flexibilidade para a proposição de cenários alternativos de conservação.

Em campo, a única prática conservacionista observada em cultivos agrícolas foi o terraceamento das plantações de Café. Portanto, na tabela de atributos para cada um dos três mapas de uso e cobertura da terra, o valor do C para essa cultura foi multiplicado por 0,5. A Figura 19 exhibe alguns dos usos e coberturas da terra na região de estudo.

Figura 19: Cultura de Banana e Café na BHRDB



Fonte: do autor (2021).

Desta maneira, nas tabelas de atributos dos *shapefiles* referentes aos anos analisados, foram adicionados os pesos de práticas conservacionistas de maneira conjunta ao uso e manejo do solo, bem como serão desenvolvidos cenários de adoção de práticas conservacionistas em outras culturas, visando minimizar a erosão na bacia hidrográfica.

Para o ano de 1970 trabalhou-se com o mapa de uso e cobertura da terra elaborado a partir de ortofotos fornecidas pelo IDAF. A partir delas, foi elaborado o mapa de uso e cobertura da terra de Santos (2016). Tomando como base os limites atualizados da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, foi criada uma versão mais acurada desse mapeamento, contemplando zonas que não estavam inclusas na versão da publicação anterior e que refletem de maneira mais realista a extensão territorial da área de estudo, atualizada no ano de 2021 a partir de novos levantamentos aéreos.

Assim como no trabalho de Santos (2016), o número de classes de uso e cobertura permaneceu igual para o mapeamento de pouco mais de meio século de idade, sendo dividido em: Afloramento rochoso, Massa d'Água, Edificação, Solo exposto, Brejo, Cultivo agrícola anual, Pastagem, Macega e Florestas/Matas Naturais.

Foram utilizados critérios semelhantes aos de 1970 para a obtenção do mapa de uso e cobertura da terra no ano de 2012, ou seja, baseando-se em imagens de aerolevanteamento, coletadas entre 2012 e 2015, fornecidas pela empresa HIPARC Tecnologia, de resolução espacial de 0,25m por *pixel*.

A partir delas, realizou-se o processo de fotointerpretação, resultando no mapeamento de cobertura vegetal nativa e uso da terra, desta vez representado em 14 diferentes classes ante as 9 de 1970, justificado pela distinção dos tipos de cultivo agrícola anuais identificados na região (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2012). As áreas não contempladas nos novos limites da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no arquivo original de mapeamento de uso e cobertura da terra foram fotointerpretadas pelo autor.

Em 2019, foram utilizados critérios semelhantes aos de 1970 e 2012 para a obtenção do mapa de uso e cobertura da terra no ano de 2019, no entanto, as imagens que serviram de origem para a confecção do mapa de uso e cobertura da terra foram obtidas a partir dos satélites imageadores KOMPSAT-3/3A nos anos de 2019 e 2020 e adquiridas pelo Instituto Jones dos Santos Neves (IJSN-ES) para avaliação do projeto Reflorestar⁷. A resolução espacial dos mosaicos fotográficos realizados pelos satélites é de 1,6m por *pixel* para imagens multiespectrais (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2021).

A partir dessas imagens, realizou-se o processo de fotointerpretação, resultando no mapeamento de cobertura vegetal nativa e uso da terra, desta vez representado em 19 diferentes classes ante as 9 de 1970 e as 14 de 2012, graças à distinção ainda mais precisa das classes de Cultivo Agrícola, introduzindo as áreas ocupadas por Cana-de-Açúcar e Reflorestamento com Seringueiras e a divisão de Outros Cultivos Agrícolas em Anuais e Temporários, bem como a separação dos graus de recuperação da Mata Nativa e a adição das áreas afetadas pelo Extrativismo Mineral. As áreas não contempladas nos novos limites da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no arquivo original de mapeamento de uso e cobertura da terra foram fotointerpretadas pelo autor.

⁷ Do sítio da Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos: "...o Programa Reflorestar é uma iniciativa do estado do Espírito Santo que tem como objetivo promover a restauração do ciclo hidrológico por meio da conservação e recuperação da cobertura florestal... estimulando a adoção de manejo sustentável dos solos." (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2012)

5.3) Estágio de Modelagem

A partir da aplicação da equação adaptada de Wischmeier e Smith (1978) e dos parâmetros estabelecidos para cada uma das variáveis da mesma, sendo estes: Erosividade das Chuvas (R), Erodibilidade dos Solos (K), Fator Topográfico (LS) e Fator de Uso e Cobertura da Terra com Práticas Conservacionistas (CP), foi possível determinar a perda de solos para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas nos períodos analisados.

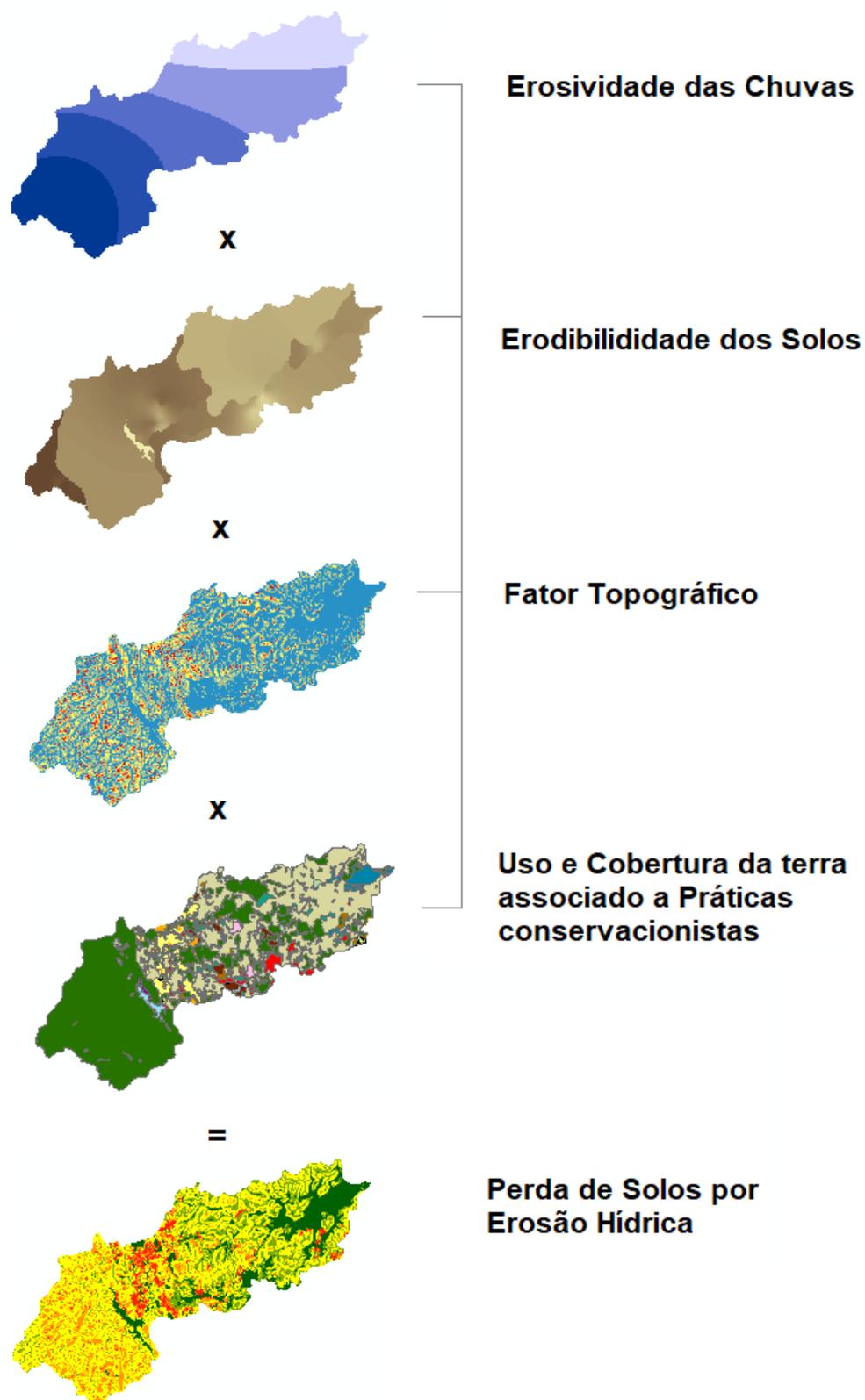
Os resultados foram obtidos a partir da técnica de álgebra de mapas, em que todas as variáveis espacializadas foram convertidas para o formato Raster (matricial), com cada um dos seus elementos sendo representados por pixels (pontos) usando a ferramenta *Polygon to Raster* do software ArcMap™, versão 10.4.1 (*ArcToolbox > Conversion Tools > To Raster > Polygon to Raster*).

Desta forma, as imagens representando cada uma das variáveis pode ser multiplicada a partir da ferramenta *Raster Calculator* (*ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra > Raster Calculator*), que executou as expressões de álgebra de mapas a partir da sintaxe da linguagem de programação Python, tendo como resultado uma imagem matricial com valores atribuídos para cada um dos pontos de acordo com a operação matemática realizada.

O procedimento foi realizado múltiplas vezes, com os shapefiles dos fatores K, R, e LS sendo repetidos em todas as iterações, enquanto que o shapefile do fator CP variou conforme os resultados diferentes para os distintos usos e cobertura da terra e práticas conservacionistas para os anos de 1970, 2012 e 2019.

A seguir (Figura 20), é demonstrada de maneira ilustrativa como o procedimento de álgebra de mapas apresenta como resultado a espacialização da perda de solos por área.

Figura 20: Esquema ilustrativo do processo de aplicação da EUPS a partir Álgebra de Mapas para obtenção da distribuição espacializada da perda de solos



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.4 Estágio de Resultados Finais e Validação

Após a execução da modelagem, foram obtidos dois tipos de produtos. O primeiro é um mapa de Potencial Natural de Erosão (PNE), indicando qual seria o pior cenário possível para perdas de solos por erosão hídrica na BHRDB, no qual não há nenhuma prática conservacionista e o uso e a cobertura da terra consiste apenas em solos expostos, o que potencializaria de maneira significativa os efeitos erosivos na região. Esse mapa serve como referencial do grau de preservação da bacia hidrográfica, uma vez que quanto mais próximo um ponto estiver do grau de perdas observado nele, menos preservada esta localidade estará. O outro tipo de produto são os mapas referentes aos anos de 1970, 2012 e 2019 das perdas reais de solos por erosão hídrica para a área de estudo, sendo influenciados pelos fatores do mapa de PNE e atenuado pelas práticas conservacionistas implementadas na região, bem como com os distintos usos e coberturas da terra observados a partir dos mapas homônimos.

Posteriormente, realizou-se a análise integrada dos fatores que constituem a EUPS, visando identificar as regiões mais e menos preservadas de Duas Bocas, além do comparativo entre os mapas para os três períodos históricos diferentes, visando compreender quais medidas foram responsáveis pelas mudanças na dinâmica erosiva da área de estudos.

6) RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão discutidos os dados, com ênfase na análise integrada dos elementos constituintes da EUPS, em especial o fator de erodibilidade dos solos da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, com posterior comparação da evolução da perda de solos entre os anos de 1970 e 2019, a partir da expressão dos resultados através de mapas temáticos.

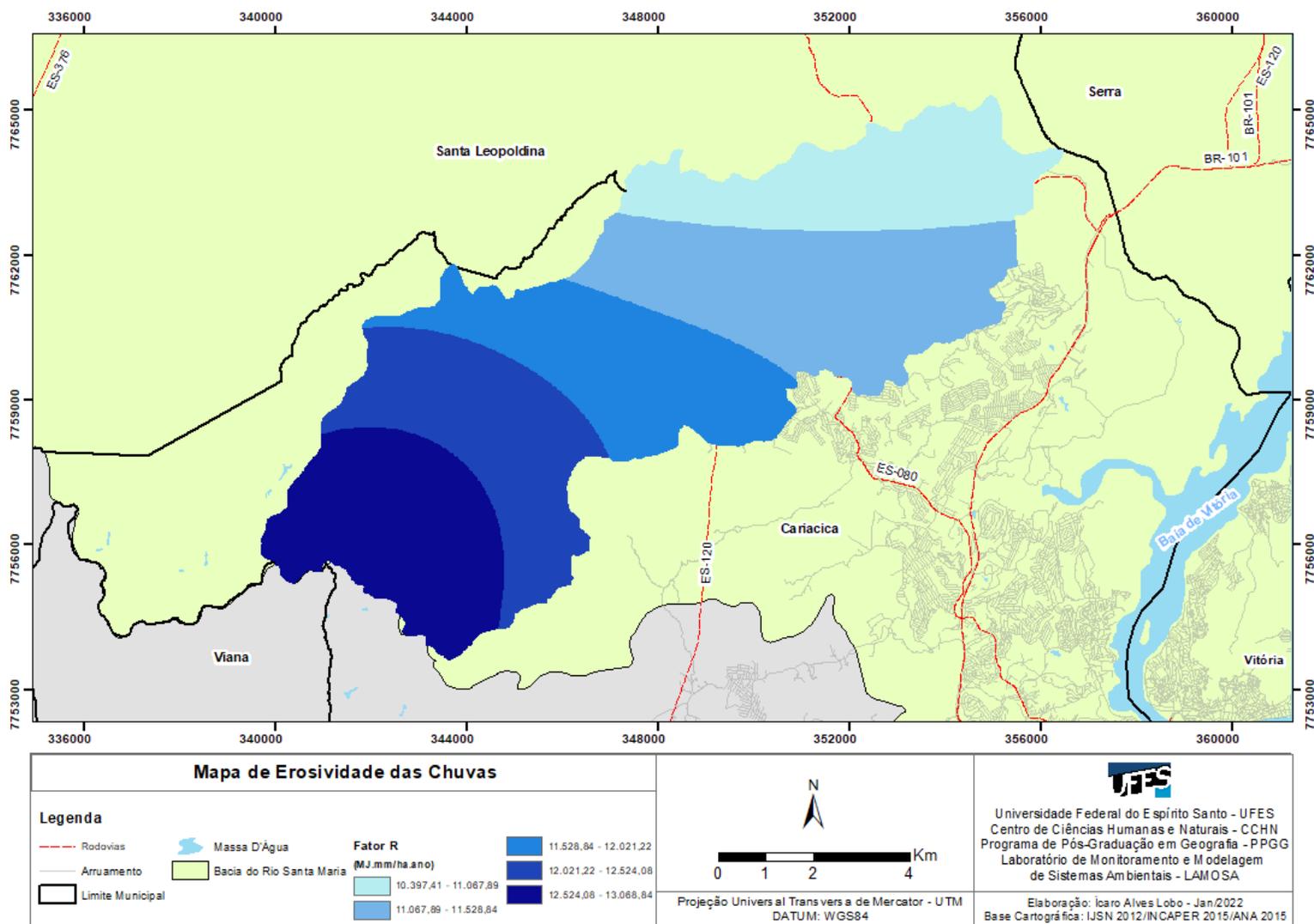
6.1) Erosividade das Chuvas

O mapa de erosividade das chuvas (figura 20) demonstra que os índices para a região de Duas Bocas variam entre 10397,41 a 13068,84 MJ.mm/ha.ano. De acordo com a escala de Carvalho (1994) de índices de erosividade para o território brasileiro, toda a área de estudos apresenta o grau Muito forte. Bastos *et al.* (2015) demonstraram que nesta bacia hidrográfica há distintos graus pluviométricos em virtude da topografia local, com regiões mais elevadas sendo responsáveis por causar precipitações orográficas em sua porção mais ocidental.

Desta maneira, ao considerarmos apenas as precipitações, todo o território da BHRDB é suscetível a sofrer elevados índices de erosão deflagrados pelas chuvas, uma vez que a energia cinética oriunda deste fenômeno climático é suficientemente forte para provocar o desprendimento das partículas de solo.

Ao considerarmos os valores médios de erosividade das chuvas para a região Sudeste do Brasil, que, segundo Oliveira, Wendland e Nearing (2013) varia entre 8000 e 10000 MJ.mm/ha.ano, a área de estudo demonstra um comportamento de potencial erosivo por eventos de precipitação ainda mais severo, corroborando para a necessidade de se observar os efeitos históricos da perda de solo na região de Duas Bocas. A Figura 21 contém a distribuição da erosividade das chuvas na área de estudos.

Figura 21: Mapa de Erosividade das chuvas para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas



Fonte:Elaborado pelo autor (2022).

6.2) Erodibilidade dos Solos

Com base na metodologia descrita no capítulo anterior, os resultados obtidos para a erodibilidade dos solos para os pontos de coleta ao longo da BHRDB estão dispostos na tabela abaixo

TABELA 8: ERODIBILIDADE DOS SOLOS COLETADOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS

Ponto ⁸	K (Mg.ha.h.ha ⁻¹ .MJ ⁻¹ .mm ⁻¹)	Classificação (EMBRAPA, 2013)	Uso da terra (2019-21)
1	0,0264	Argissolo Amarelo	Pastagem
2	0,0264	Argissolo Amarelo	Pastagem
3	0,0253	Latossolo Amarelo	Cultivo Agrícola - Café
4	0,0252	Latossolo Amarelo	Cultivo Agrícola - Café
5	0,0274	Argissolo Amarelo	Cultivo Agrícola - Café
6	0,0267	Argissolo Amarelo	Cultivo Agrícola - Café
7	0,0248	Latossolo Amarelo	Cultivo Agrícola - Café
8	0,0228	Latossolo Amarelo	Solo exposto
9	0,0207	Argissolo Amarelo	Solo exposto
10	0,0229	Argissolo Amarelo	Solo exposto
11	0,0223	Argissolo Amarelo	Solo exposto
18	0,0283	Argissolo Amarelo	Cultivo Agrícola - Coco-Baía
19	0,0227	Argissolo Amarelo	Pastagem
20	0,0290	Argissolo Amarelo	Pastagem
21	0,0323	Cambissolo Háplico	Cultivo Agrícola - Banana
22	0,0323	Cambissolo Háplico	Cultivo Agrícola - Banana
23	0,0270	Cambissolo Háplico	Cultivo Agrícola - Banana
24	0,0252	Cambissolo Háplico	Solo exposto
25	0,0225	Argissolo Amarelo	Pastagem
26	0,0256	Argissolo Amarelo	Outros cultivos agrícolas anuais
28	0,0310	Argissolo Amarelo	Pastagem
29	0,0300	Argissolo Amarelo	Pastagem
30	0,0293	Cambissolo Háplico	Cultivo Agrícola - Banana
31	0,0338	Cambissolo Háplico	Cultivo Agrícola - Banana
32	0,0255	Cambissolo Háplico	Pastagem

⁸ As amostras coletadas nos pontos 12-17 e 27 foram descartadas por não terem seguido a metodologia e/ou serem repetições de outros pontos.

33	0,0272	Cambissolo Háplico	Pastagem
34	0,0285	Cambissolo Háplico	Pastagem
		Assoc. Latossolo	
35	0,0436	Amarelo + Cambissolo Háplico	Mata Nativa
		Assoc. Latossolo	
36	0,0387	Amarelo + Cambissolo Háplico	Mata Nativa
		Assoc. Latossolo	
37	0,0403	Amarelo + Cambissolo Háplico	Mata Nativa
38	0,0311	Cambissolo Háplico	Mata Nativa
39	0,0304	Cambissolo Háplico	Mata Nativa
40	0,0289	Cambissolo Háplico	Mata Nativa
41	0,0340	Neossolo Litólico	Solo exposto
42	0,0301	Neossolo Litólico	Pastagem
43	0,0312	Neossolo Litólico	Pastagem
44	0,0246	Gleissolo Háplico	Pastagem
45	0,0294	Gleissolo Háplico	Brejo
46	0,0305	Gleissolo Háplico	Brejo

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A seguir, encontram-se os valores de erodibilidade tabelados para as classes de solos presentes na BHRDB, de acordo com o mapeamento da EMBRAPA (1978) na escala de 1:280.000.

TABELA 9: ERODIBILIDADE ESPERADA PARA AS CLASSES DE SOLOS PRESENTES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS, COM REFERENCIAIS BIBLIOGRÁFICOS.

Classificação	K (Mg.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹)	Fonte
Latossolo Amarelo/Cambissolo Háplico	0,0210 ⁹	Leitão (1995)
Latossolo Amarelo	0,0277	Morais e Sales (2017)
Argissolo Amarelo	0,0200	Marques <i>et al.</i> (1997)
Gleissolo Háplico	0,0150	Brasil (1997)
Neossolo Litólico	0,0530	Corrêa, Moraes e Pinto (2012)
Cambissolo Háplico	0,0355	Silva <i>et al.</i> (2009)

Fontes: indicadas na tabela

⁹ O valor de K para esse solo é aproximado, de acordo com parâmetros como granulometria média e teor de carbono orgânico, pois não foram encontradas referências que contemplassem as particularidades da classe presente na área de estudo.

A partir da comparação entre as duas tabelas, é possível inferir que a metodologia indireta para o levantamento da erodibilidade pode ser considerada satisfatória para a maior parte das classes de solo presentes na bacia hidrográfica do Rio Duas Bocas, com destaque para o Cambissolo Háplico, que teve como valor médio de erodibilidade a partir das amostras levantadas em campo de 0,0382. O Gleissolo Háplico também apresentou uma boa aproximação com os valores de referência, apresentando valor médio de K de 0,0282, indicando que as análises a partir das equações de Sharpley e Williams (1990), embora não empreguem fatores como a textura ou o tamanho médio de diâmetro de partículas que constituem o solo, podem ser aplicadas sem grandes prejuízos em amostras coletadas do primeiro horizonte de cada solo a ser estudado.

O Latossolo Amarelo, por sua vez, apresentou valores ligeiramente destoantes dos de referência, no entanto, ainda apresenta uma aproximação relativamente significativa, com média de 0,0245. Já o Argissolo Amarelo teve valor médio de 0,0259, apresentando maior erodibilidade do que o de referência, com valores mais similares aos da literatura nas amostras coletadas sem cobertura vegetal. As amostras coletadas em pontos com cobertura de pastagem foram realizadas em regiões de contato com outras classes de solo, o que dificultou a sua identificação.

A classe mais discrepante entre os valores de erodibilidade encontrados em campo e os tabelados foi a de Neossolos Litólicos, que, embora estivessem bem característicos como tais, sendo solos rasos de horizontes não superiores a 50cm até o contato com a rocha e sendo encontrados em relevos declivosos (EMBRAPA, 2013), seu valor médio de erodibilidade foi de apenas 0,0321.

A dispersão dos pontos de coleta não foi tão acentuada em virtude da impossibilidade de se chegar a algumas localidades, por se tratar de caminhos sem acesso para automóveis, propriedades privadas cujos donos não autorizaram a entrada para a coleta de amostras ou até mesmo estradas públicas que se encontravam bloqueadas.

Convém lembrar que os valores tabelados se referem a levantamentos realizados em bacias hidrográficas de outras regiões do país, tais como Minas Gerais (Marques *et al.*, 1997; Morais e Sales, 2017; Silva *et al.*, 2009), São Paulo (Corrêa, Morais e Pinto,

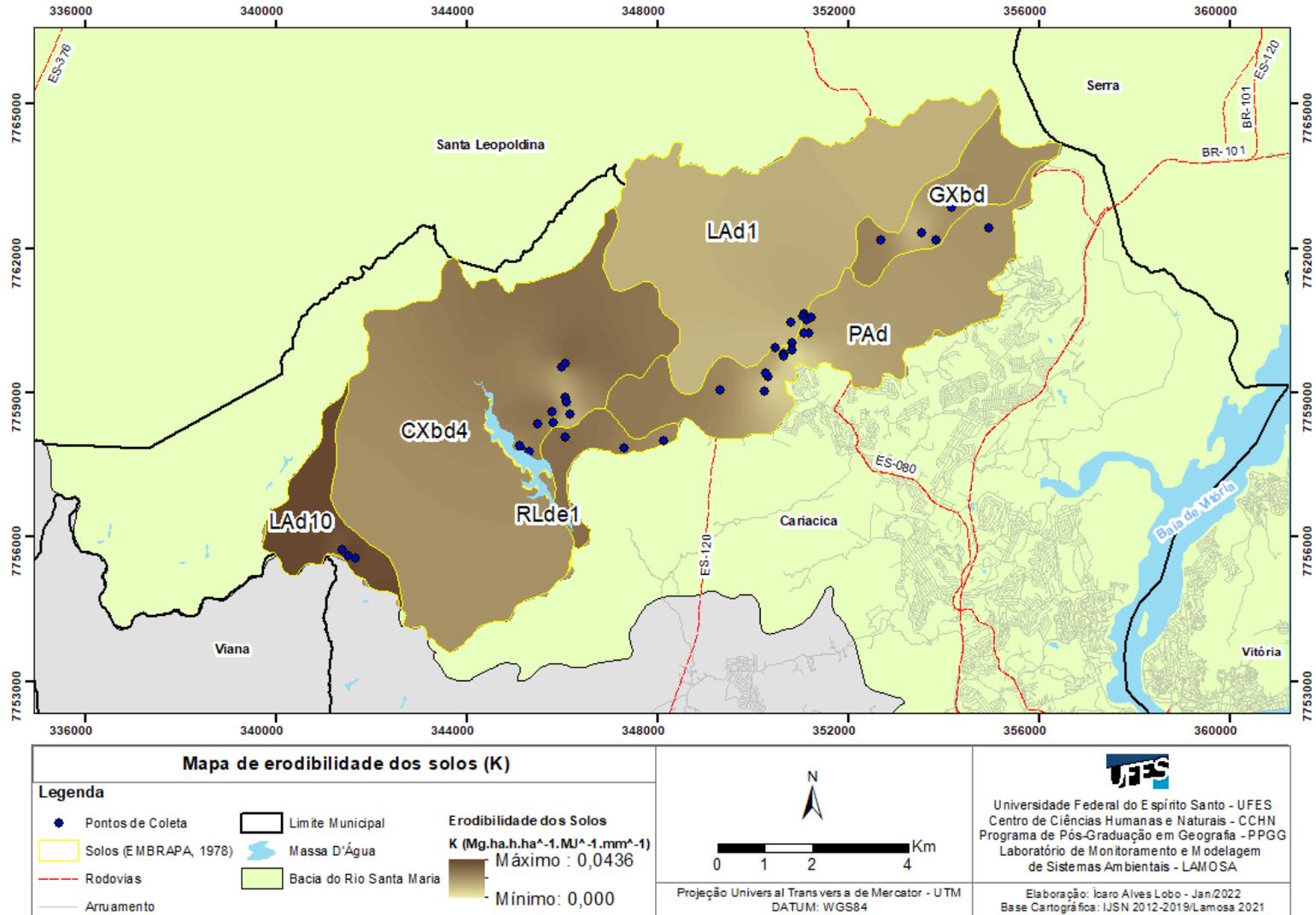
2012) e Ceará (Leitão, 1995), com distintos teores de matéria orgânica em suas composições. Entretanto, tais valores serão posteriormente comparados a partir da modelagem da EUPS como forma de validação dos resultados obtidos com a erodibilidade calculada de maneira indireta.

Cabe ainda pontuar que o mapeamento de referência para a escolha dos pontos de coleta encontra-se na escala de 1:280.000, sendo muito pequeno para uma área de estudo de aproximadamente 82 km². Logo, os dados de erodibilidade obtidos a partir desta pesquisa indicam uma necessidade de reclassificação do mapa pedológico da Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas.

Seguindo a classificação de Carvalho (1994), todas as classes de solo identificadas nos pontos amostrais indicam baixo valor de erodibilidade, uma vez que não atingem o patamar de 0,15 Mg.ha.h.ha⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹.

Tomando como base o mapa a seguir (Figura 22), é possível perceber que os pontos com K mais elevado dispõem-se na parte oriental da área de Cambissolos Háplicos, além da região de Neossolos Litólicos e a porção mais a oeste da área de Gleissolos. As localidades onde as amostras continham um maior teor de areia coincidem com os valores mais elevados de erodibilidade, uma vez que a maior presença de partículas dessa fração implica em um menor grau de coesão das partículas que constituem os solos graças ao seu grande tamanho, resultando em solos mais facilmente erodíveis.

Figura 22: Mapa de Erodibilidade dos solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas



Fonte:Elaborado pelo autor (2022).

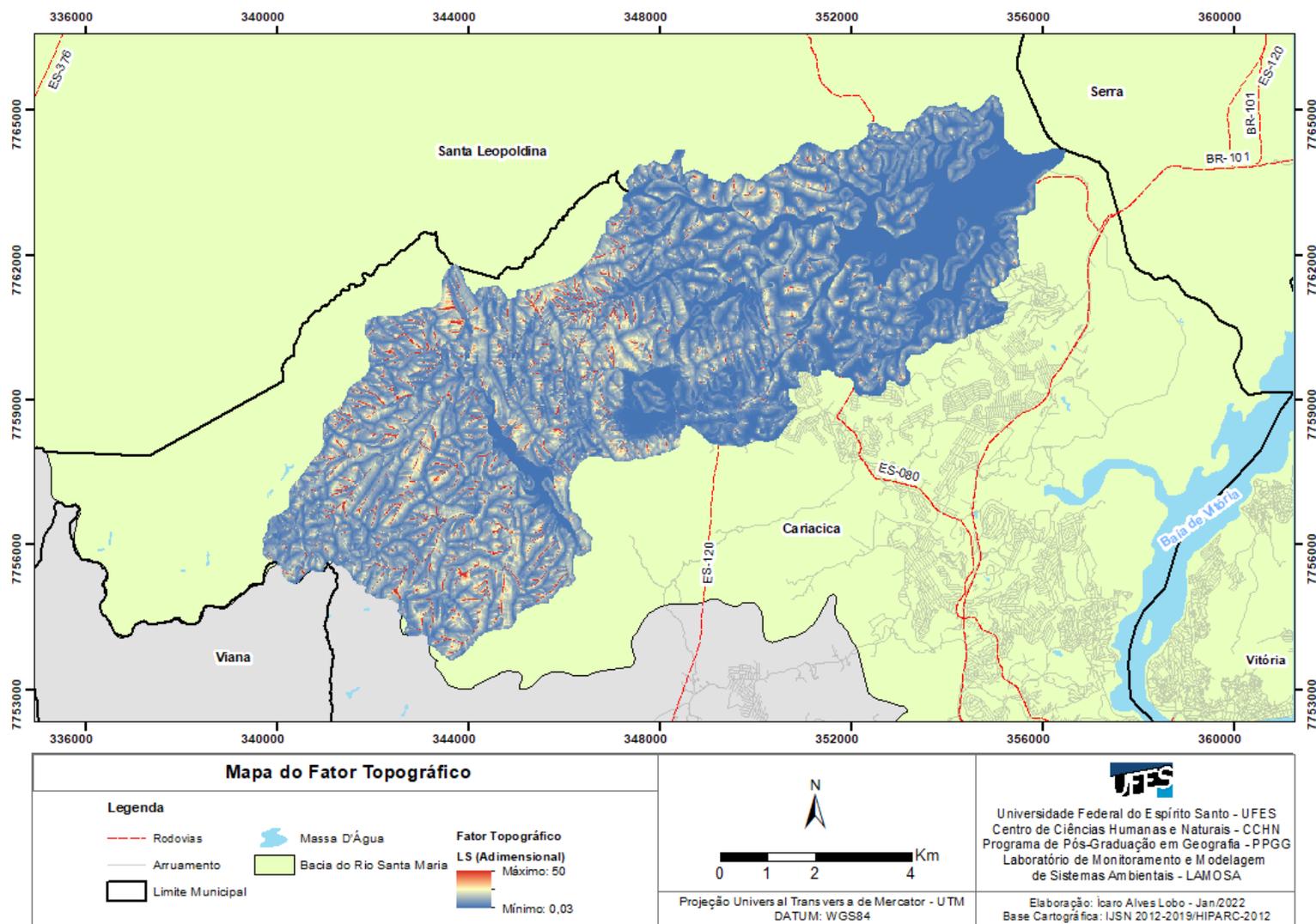
6.3) Fator LS

Ao utilizar o MDE da região na equação desenvolvida por Desmet e Govers (1996) a partir do SIG SagaGIS, foi possível obter o mapa do fator topográfico da BHRDB. Ele indica que o relevo contém mais encostas e tem maiores gradientes de declividade na porção ocidental de Duas Bocas, enquanto que as áreas mais planas da bacia concentram-se na zona mais oriental, onde o rio Duas Bocas deságua.

É importante observar que as áreas que abrigam os maiores fatores topográficos também estão associadas às cabeceiras dos diversos córregos e riachos que alimentam o rio Duas Bocas.

O valor mínimo observado para esse fator foi de 0,03, e, para a elaboração do seu mapa (Figura 23), considerou-se os valores 95% mais representativos, sendo ignorados os pontos com LS superior a 50, uma vez que elevados valores para o fator LS (comprimento de encosta superior a 122m e declividade acima de 18 graus) não são considerados precisos nesse tipo de modelagem(WISCHMEIER; SMITH, 1978)

Figura 23: Mapa do Fator Topográfico para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas



Fonte:Elaborado pelo autor (2022).

6.4) Potencial Natural de Erosão do Solo (PNE)

Representa a interação dos principais fatores naturais do meio físico que possam intervir no processo de erosão hídrica. Assim, ele corresponde às estimativas de perda de solo em áreas permanentemente descobertas e sem intervenção humana.

O PNE da área de estudo é obtido a partir do produto dos mapas de Erosividade das Chuvas, Erodibilidade dos Solos e Fator Topográfico, considerando os piores cenários de uso e cobertura da terra (solo exposto) e ausência de práticas conservacionistas.

A classificação dos índices de perda do solo é estabelecida pela FAO (1980) e está disposta na Tabela 10.

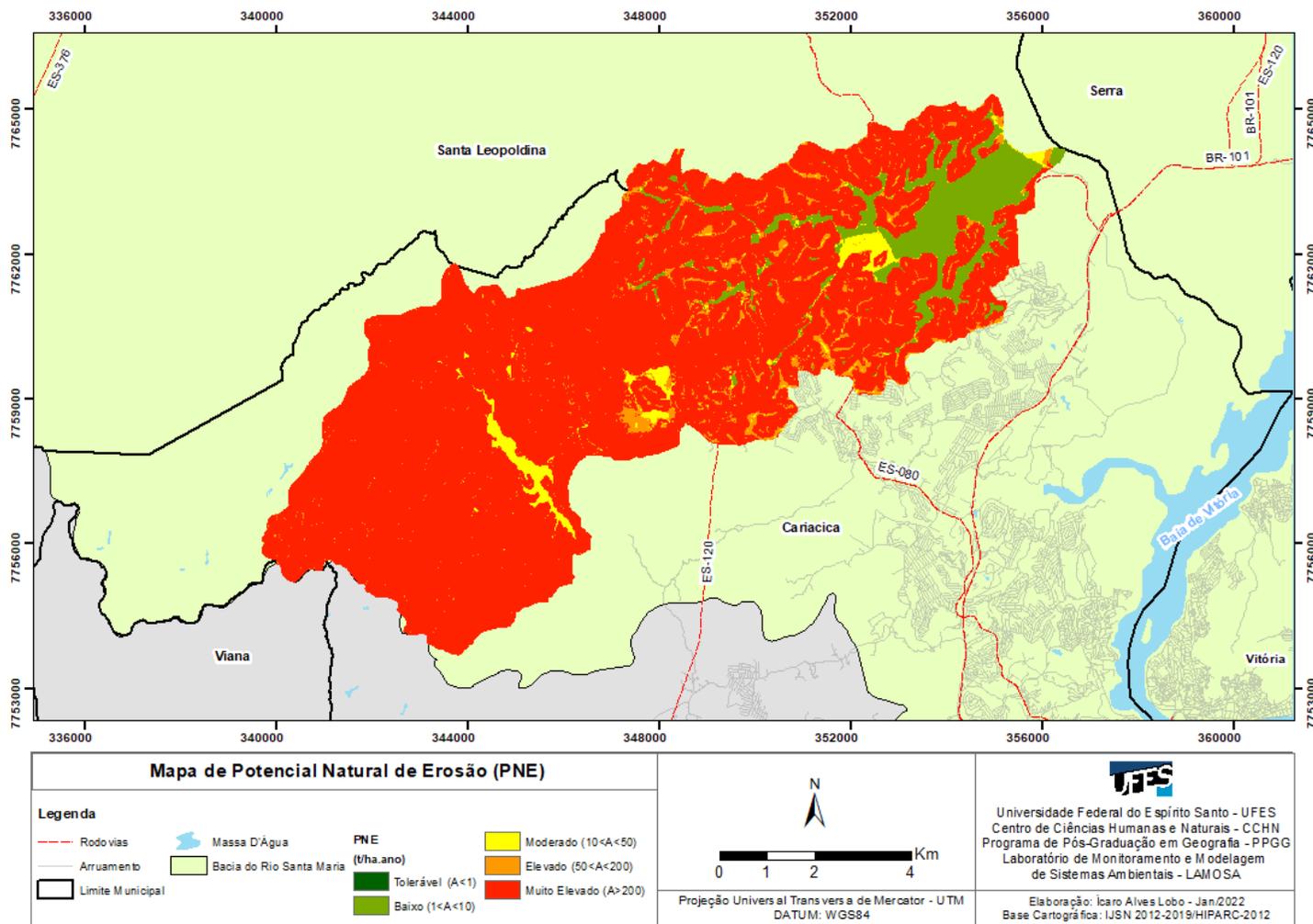
TABELA 10: ÁREA EM PORCENTUAL E KM² PARA CADA CLASSE DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA CONSIDERANDO O POTENCIAL NATURAL DE EROSÃO DA BHRDB

Perda de solo (t/ha.ano)	Grau de erosão hídrica	Área (%)	Área (km ²)
< 1	Tolerável	0,00	0,00
1 - 10	Baixo	7,42	6,15
10 - 50	Moderado	2,54	2,11
50 - 200	Elevado	4,45	3,68
> 200	Muito Elevado	85,59	70,88
Total		100,00	82,82

Fonte: Elaborado pelo autor.

As áreas com menor PNE, de índice Baixo, estão situadas na planície de inundação e em seus arredores e ocupam 7,42% ou 6,15km². As perdas de grau Moderado, representando 2,54% ou 2,11km² e as de grau Elevado, que se dispõem em 4,45km% ou 3,68km² estão nas zonas de transição entre os baixos relevos e os mais escarpados. O índice dominante foi o Muito Elevado, em 70,88km² ou 85,59% da área total da bacia. Não foi observada a classe Tolerável nesse cenário. A Figura 24 exhibe o mapa de PNE na região de Duas Bocas.

Figura 24: Mapa do Potencial Natural de Erosão para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas



Fonte:Elaborado pelo autor (2022).

6.5) Perda de solos na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas

6.5.1) Uso e Cobertura da Terra em 1970

Considerando o uso e cobertura da terra demonstrado na Tabela 11, serão apresentados e discutidos os dados com os novos limites da BHRDB, tendo sido esse adaptado de Santos e Marchioro (2018 e 2020).

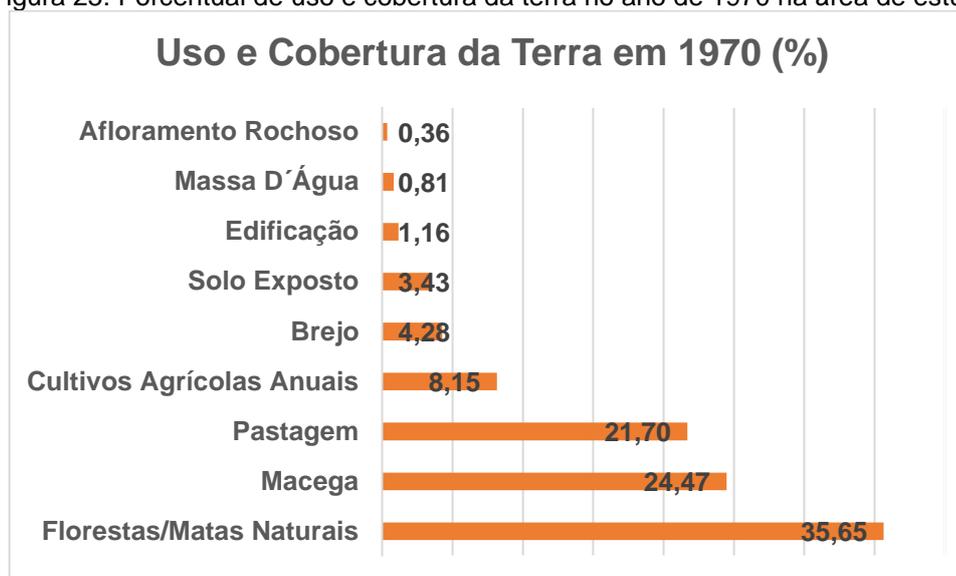
TABELA 11: ÁREA EM KM² E HECTARE E PERCENTUAL DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA O ANO DE 1970 DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS.

Classes de Uso e Cobertura da Terra	Área (km²)	Área (ha)	%
Afloramento Rochoso	0,30	29,93	0,36
Brejo	3,54	354,22	4,28
Cultivos Agrícolas Anuais	6,76	675,66	8,15
Edificação	0,96	95,70	1,16
Florestas/Matas Naturais	29,53	2953,50	35,65
Macega	20,28	2027,67	24,47
Massa D'Água	0,67	67,42	0,81
Pastagem	17,98	1797,57	21,70
Solo Exposto	2,84	283,97	3,43
Total	82,86	8285,64	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para esse período histórico, a classe de maior representatividade em área para a bacia hidrográfica foi a de Florestas e Matas Naturais, compreendendo uma área de 35,65% do total, incluindo toda a atual Rebio de Duas Bocas, bem como esparsas porções situadas na parte central e também na região mais oriental de seu território. Destaca-se também a presença significativa da classe de Macega, ocupando 20,28km² ou 24,47%, sendo seguida pela cobertura de Pastagem, que se distribuía por 17,98km² ou 21,70% da área de estudos no ano de 1970, conforme a imagem a seguir (Figura 25).

Figura 25: Porcentual de uso e cobertura da terra no ano de 1970 na área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os Cultivos Agrícolas Anuais, que contemplam para a época as plantações de Banana e Café, eram a quarta classe mais utilizada na região, ocupando 6,76 km² ou 8,15% da bacia hidrográfica. Por sua vez, os Brejos apareciam em 4,28% do território e estavam dispostos sobre 3,54 dos quase 83 km² totais, representando as planícies de inundação e os terraços fluviais na região de deságue do Rio Duas Bocas.

Observou-se ainda que o índice de cobertura por Solo Exposto era de 2,84 km² ou 3,43%, enquanto que a classe de Edificação estava presente em 0,96 km² ou 1,16% da área de estudo e, de acordo com Santos e Marchioro (2018; 2020) representava construções de pequeno porte como residências rurais, além de estradas vicinais, rodovias estaduais e parte da sede do município de Cariacica dentro do perímetro da bacia.

A classe de Massa d'Água, que ocupava 0,67 km², foi a única área inalterada na atualização dos limites de fronteira da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, se estendendo a 0,81% dos 82,86 km² e correspondia ao volume hídrico represado na Rebio e as lagoas e açudes presentes nas propriedades rurais vizinhas a então reserva florestal. Por fim, a classe de Afloramentos Rochosos é a menos expressiva desse mapeamento, estando presente em apenas 0,30 km² ou 0,36% da área,

situando-se nos pontos de maior altitude e declividade da bacia em sua zona mais central.

Convém lembrar que a bacia de Duas Bocas se situa entre os municípios de Cariacica, Santa Leopoldina e Viana, e seus domínios estão essencialmente nos limites da Região Metropolitana da Grande Vitória, com apenas 0,06% de sua área não pertencendo a essa divisão político-administrativa que contempla as cidades mais populosas e economicamente desenvolvidas do Espírito Santo.

Historicamente, a cidade de Cariacica, que detém a maior área da bacia de Duas Bocas (85,15%), teve a ocupação humana originalmente estabelecida por povos nativos do Brasil da tribo dos Goitacás, da qual não restam informações atuais (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2020). Posteriormente, com a colonização do município por missões da Companhia de Jesus, foram criadas na região de Duas Bocas e em suas cercanias pequenos núcleos de propriedades rurais, em especial fazendas e engenhos, indicando o uso da terra para o cultivo de Cana-de-Açúcar, além de uma igreja e um colégio (ANDRÉ, 2012).

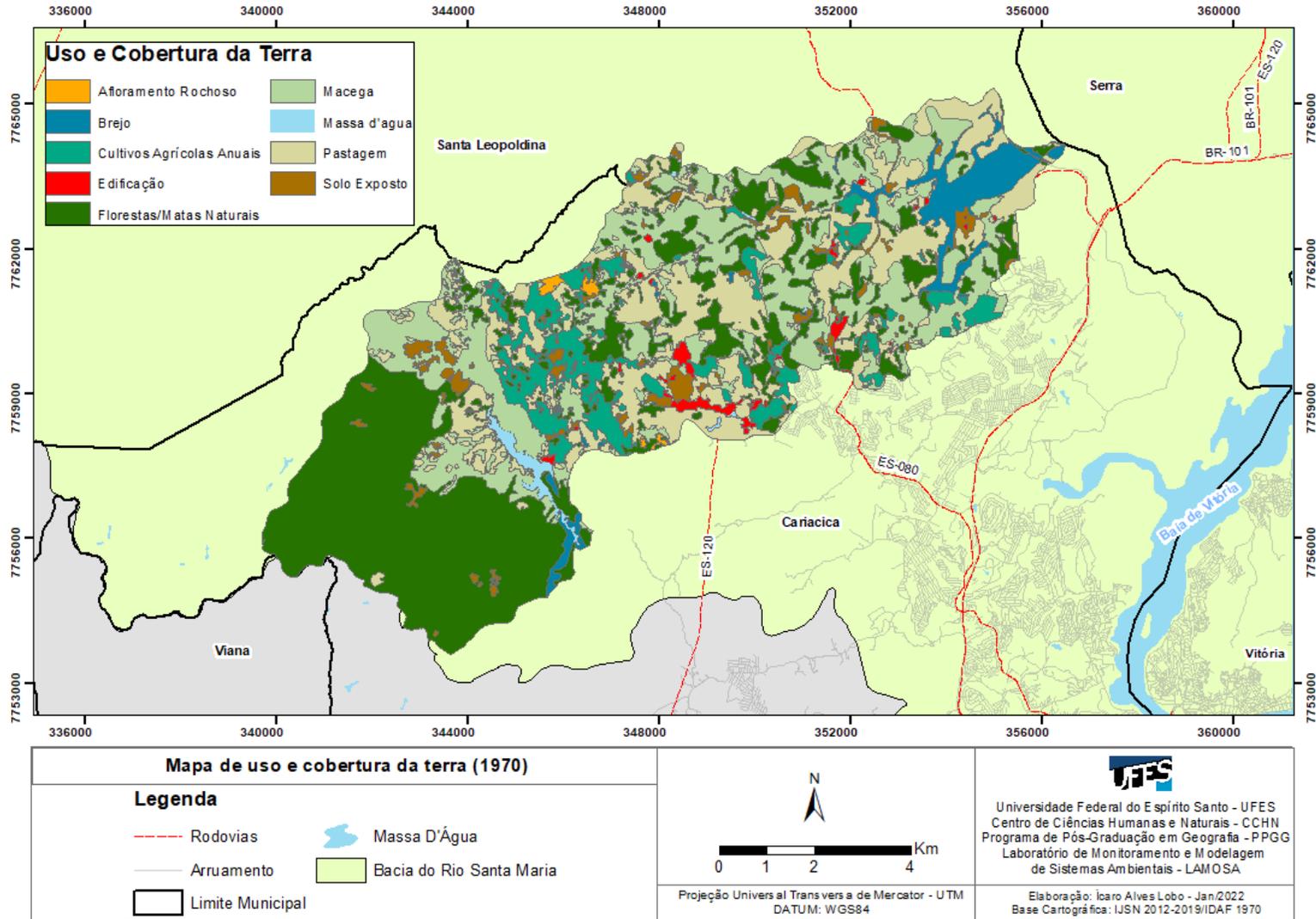
Uma das justificativas da conservação da Mata Atlântica da região ante os territórios vizinhos como as cidades de Vitória e Vila Velha, situadas a menos de 20km de Duas Bocas, foi o breque do processo de interiorização e ocupação humana, causado pela expulsão dos Jesuítas do Brasil no ano de 1759 por decreto do secretário de estado português, Marquês de Pombal. Desta forma, por um período de quase 80 anos, a população que habitava a região da bacia hidrográfica diminuiu graças ao esvaziamento dos núcleos de ocupação construídos até então (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2020).

O adensamento populacional da região só voltaria a ocorrer no século seguinte, com a vinda de imigrantes pomeranos, holandeses e mão-de-obra escravizada do continente africano. A maior parte dessa população estava envolvida com a economia cafeeira, mais latente nas cidades da região serrana do Espírito Santo como Santa Leopoldina, Santa Teresa e Santa Maria de Jetibá, porém, de acordo com André (2009), a presença de propriedades familiares e entrepostos comerciais ocorria na atual área da Rebio de Duas Bocas.

Embora haja registro de quando se iniciaram as culturas de Cana-de-Açúcar e Café em Duas Bocas, o mesmo não pode ser dito para o cultivo de Banana, que tornar-se-ia a principal *commodity* produzida nas fazendas da região. Similar problema é encontrado ao se discutir o estabelecimento das pastagens na região (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2020). Entretanto, com o estabelecimento da lei estadual nº 2.095 pelo governador Francisco Lacerda de Aguiar, em 12 de janeiro de 1965, foi criada a Reserva Florestal de Duas Bocas, de área aproximada de 2200 hectares, tendo início as primeiras medidas de controle de avanço dos cultivos agrícolas e das pastagens ante as áreas de Mata Nativa (SANTOS, 2016).

Em relação ao processo de urbanização e industrialização de Cariacica, o mesmo viria a ocorrer de maneira mais intensa a partir da década de 1960, com a criação da rodovia federal BR-262 no ano de 1967 e o crescimento do bairro de Campo Grande, que fica na margem sul da autopista e abriga um dos principais polos de manufaturas e comércio de rua do Espírito Santo. No entanto, o custo social e ambiental desse avanço da malha urbana seria demasiado alto, pois ocasionou a ocupação desordenada do território a partir da disponibilidade de lotes de menor custo do que os das cidades vizinhas da Região Metropolitana da Grande Vitória (ANDRÉ, 2009), que não estava preparado para o fluxo migratório que ocorreria de pessoas do interior do Espírito Santo e de demais regiões do Brasil, refletindo em problemas de ordem habitacional, elevados índices de desemprego, bem como na precariedade de serviços públicos. A Figura 26 exhibe as áreas de cada classe de uso e cobertura da terra para o ano de 1970.

Figura 26: Mapa de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 1970.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022), a partir do mapa de Santos (2016).

6.5.2) Perda de solo para o ano de 1970

A taxa de perda de solo anual, indicada em toneladas por hectare ao ano, pode ser classificada em cinco graus distintos, variando entre tolerável (abaixo de 1 ton/ha.ano) a muito elevado (acima de 200 ton/ha.ano), conforme metodologia proposta pela Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO, 1980).

Os resultados obtidos para a perda de solo por erosão hídrica dos anos de 1970 estão dispostos na tabela 12.

TABELA 12: VALORES DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA CALCULADOS PELA EUPS EM 1970

Perda de solo (t/ha.ano)	Grau de erosão hídrica	Área (%)	Área (km²)
< 1	Tolerável	13,72	11,37
1 - 10	Baixo	24,01	19,89
10 - 50	Moderado	43,38	35,94
50 - 200	Elevado	9,23	7,65
> 200	Muito Elevado	9,67	8,02
Total		100,00	82,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Logo, o que pode ser observado é que para a região de análise no período de 1970, a maior parte da área estava classificada com o grau Moderado de erosão hídrica, compreendendo 35,94km² ou 43,38% da bacia, um índice que está disposto por todas as áreas da bacia, no entanto, apresenta-se de maneira mais significativa nas partes oeste e central, sob domínio dos solos classificados como Cambissolo Háplico, Associação entre Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico, porção sul do domínio de Latossolo Amarelo e área mais a oeste de Neossolo Litólico. Quanto à geomorfologia, predomina a presença desse índice nas Unidades Patamares Escalonados do Sul Capixaba e no contato dessa unidade com a região oriental das Colinas e Maciços Costeiros. O valor do fator topográfico para esse índice de perda de solos tende a ser superior a 5, indicando que um relevo mais declivoso e de comprimentos de encosta mais compridos influi diretamente no aumento da erosão hídrica.

Quanto ao índice de erosividade pelas chuvas, os valores mais representativos estão entre 11528,84 a 13068,84 MJ.mm/ha.ano, que, segundo Carvalho (1994), trata-se

de um índice muito elevado de erosividade, por se tratar de valores acima de 9810 MJ.mm/ha.ano. Dentre os valores identificados na área de estudo, também são os mais significativos. Em relação ao uso e cobertura da terra, há uma enorme variedade, contemplando em especial a Mata Nativa, Macega e Pastagem.

O grau Tolerável, que representa perdas de solo por erosão hídrica aceitáveis, representava 11,37km² ou 13,72% da área da bacia, estando presente nos corpos hídricos, que naturalmente não sofrem erosão, além de aparecer de maneira mais acentuada na porção mais a leste, na região da planície de inundação e de maneira esporádica na região centro-sul, sendo representado pelas classes de solo Gleissolo Háplico e, de maneira menos expressiva, pelo Latossolo Amarelo e Argissolo Amarelo. A Unidade Geomorfológica na qual essa classe se encontra mais presente é a de Planícies Costeiras, Estuários e Praias, embora se apresente de maneira menos vultuosa nas porções centrais das Colinas e Maciços Costeiros, em localidades de menor altitude. Quanto ao fator topográfico, sempre é listado entre 0,03 e 5, indicando planícies e relevos suaves.

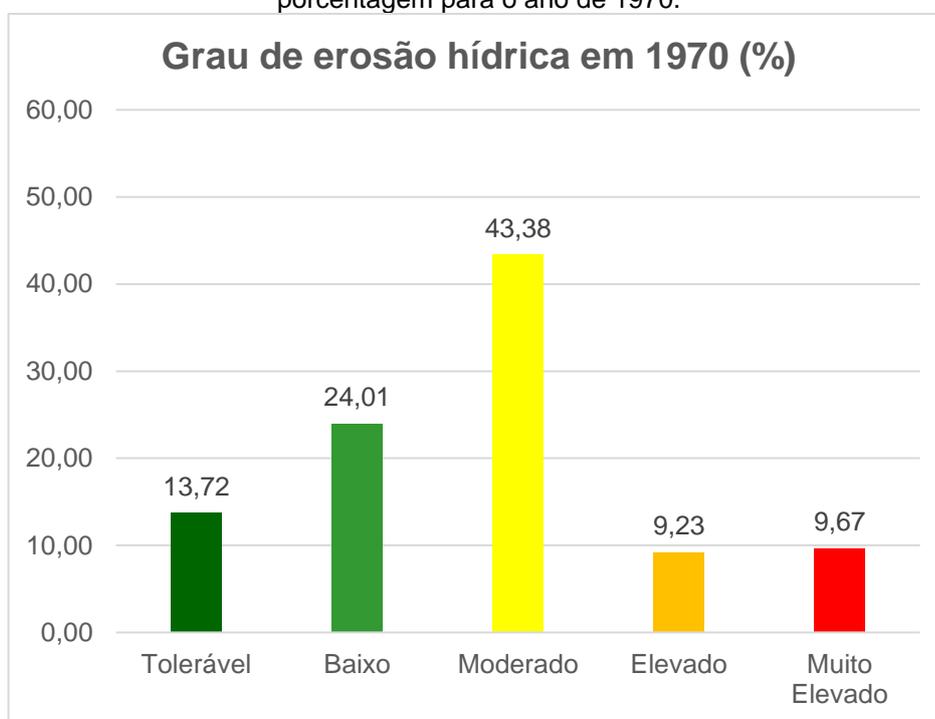
O índice de erosividade pelas chuvas do grau Tolerável, embora elevado segundo os critérios de Carvalho (1994), é classificado entre os menores índices da área, estando entre 10397,42 e 12021,22 MJ.mm/ha.ano, indicando que esse fator influencia diretamente para que as perdas de solo não ultrapassem o valor de 1 tonelada por hectare ao ano. Em relação ao uso e cobertura da terra, além do já mencionado por corpos hídricos, há também o de Edificações e Solo Exposto, que não promovem processos erosivos, além do de Brejos. Algumas áreas menos expressivas de Pastagem e Mata Nativa também estão caracterizadas pelas perdas de grau Tolerável, porém, são bem pontuais e não representam a realidade da bacia como um todo.

Para o grau Baixo, a área ocupada em 1970 era de 19,89 km² ou 24,01% do total de Duas Bocas, situando-se em manchas no compartimento de transição centro-leste, além da porção sul como um todo e de maneira tímida na área norte da atual Rebio. Os solos identificados sob essa classe são, principalmente, o Latossolo Amarelo, o Argissolo Amarelo e, na área da Rebio, o Cambissolo Háplico. Quanto ao critério geomorfológico, são encontrados de maneira mais destacada ao longo de toda a Unidade Colinas e Maciços Costeiros. Seu fator topográfico, assim como no grau

Tolerável, é sempre inferior a 5, o que representa declividades pouco acentuadas com relevos tendendo a planícies.

A amplitude pluviométrica contempla todos os valores disponíveis para a região, porém, o índice de erosividade pelas chuvas do grau Baixo é mais representativo entre 10397,42 e 12021,22 MJ.mm/ha.ano. Já o uso e cobertura da terra para esse índice é construído principalmente por Macega e Pastagem. A Figura 27 apresenta de maneira gráfica o percentual de perda de solo para o ano de 1970.

Figura 27: Indicador do grau de erosão hídrica para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, em porcentagem para o ano de 1970.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

As perdas de solo do grau Elevado, que representa 9,23% ou 7,65km² estão distribuídas de maneira mais concentrada nas partes central e ocidental da área de estudo, especialmente da área hoje compreendida pela Rebio de Duas Bocas. Os solos mais característicos de tais perdas são o Cambissolo Háplico, por toda sua extensão, além da Associação entre Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico, situada no extremo oeste da bacia. Sob os critérios geomorfológicos, as perdas do grau Elevado tendem a ocorrer na Unidade Patamares Escalonados do Sul Capixaba. O

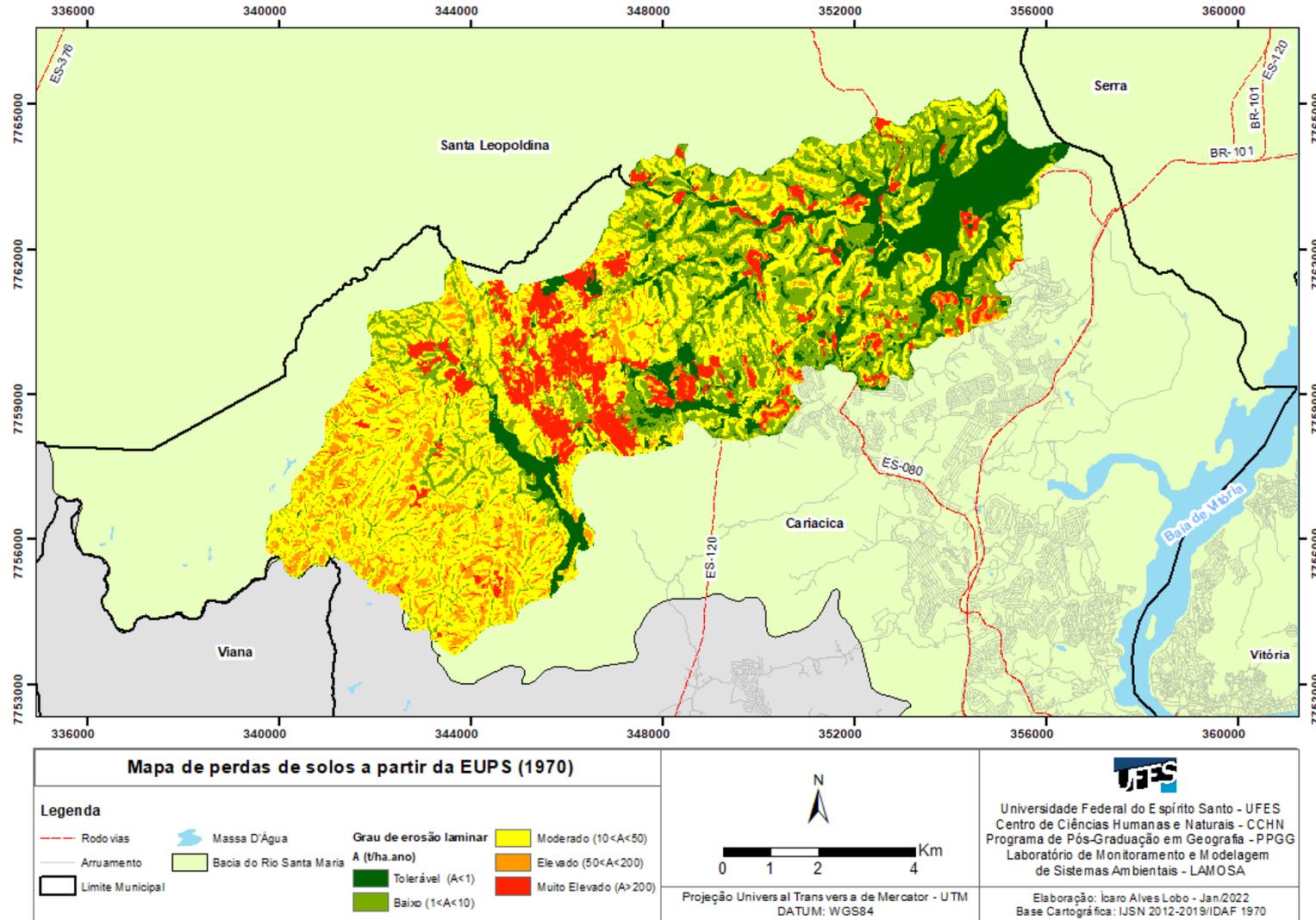
fator topográfico, por sua vez, tem valores sempre superiores a 10, podendo chegar a 50, indicando relevo pelo menos ondulado, podendo chegar a ser escarpado e com alto gradiente de inclinação.

Embora possa ser encontrado em regiões com índices de erosividade da chuva mais baixos, os valores de R para o grau Elevado concentram-se, principalmente, a partir de 11528,84 MJ.mm/ha.ano, podendo chegar a 13068,84 MJ.mm/ha.ano, indicando que os altos índices de chuva podem deflagrar perdas de solos mais intensas. Concernente ao uso e cobertura da terra, foi possível identificar a presença de Mata Nativa como elemento mais representativo para esse nível de perdas, mas também Cultivos Agrícolas e Pastagens de forma bem mais branda.

Finalmente, as perdas de grau Muito Elevado compunham 9,67% ou 8,02km² da área total da bacia. Apesar de poder ser encontrada em toda a bacia, sua concentração era mais presente, no compartimento central e em pequenas manchas na porção norte e sudeste. Os solos que são afetados por esse nível de perdas de maneira mais relevante nesse período são o Cambissolo Háplico, Neossolo Litólico e Latossolo Amarelo, além de parte do Argissolo Amarelo. As Unidades Geomorfológicas mais afetadas são a porção ocidental dos Patamares Escalonados do Sul Capixaba e a região sul das Colinas e Maciços Costeiros. Já o fator topográfico para esse índice é sempre superior a 5, podendo ultrapassar o valor de 50, demonstrando uma tendência de relevos bastante variados, desde levemente ondulado até escarpado.

Por sua vez, o uso e cobertura da terra é diverso, com Cultivos Agrícolas em geral sendo a classificação mais significativa, mas também inclui áreas extensas de Solo Exposto, que apresenta a pior proteção ante a erosão de todas as coberturas possíveis. A Figura 28 exhibe as classes de perda de solo por área na região da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 1970.

Figura 28: Mapa de perda de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas no ano de 1970



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

6.5.3) Uso e Cobertura da Terra em 2012

Para o ano de 2012, foi possível observar que houve um aumento expressivo da classe Mata Nativa, que, embora permaneça como a de maior extensão territorial em comparação com o ano de 1970, sua área passou a ser de 42,09km² ante os 29,53km² registrados no último século, ou seja, um incremento de 42,53% em relação ao valor anterior, passando a ocupar mais da metade da área total da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas (50,82%).

A explicação para esse incremento pode ser dada pelo aumento no rigor das leis ambientais de conservação de biomas florestados. Um exemplo disso pode ser observado a partir da transformação da Reserva Florestal de Duas Bocas, instaurada em 1965, para a categoria de Reserva Biológica a partir da Lei Estadual 4.503/1991, com objetivo de "... preservar a diversidade biológica e os ecossistemas em estado de evolução livre com a menor interferência direta ou indireta do homem" (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 1991).

Assim, conforme dados da tabela 13, é possível observar que a regeneração das florestas da bacia hidrográfica ocorreu em detrimento da diminuição dos usos de Macega, que perdeu 93,74% de sua cobertura original, indo de 20,28 para 1,27 km².

TABELA 13: ÁREA EM KM² E HECTARE E PERCENTUAL DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA O ANO DE 2012 DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS, COM REALCE DAS CLASSES AGRÍCOLAS EM AZUL.

Classe de Uso e Cobertura da Terra (2012)	Área (km²)	Área (ha)	%
Afloramento Rochoso	0,86	85,84	1,04
Brejo	1,89	188,81	2,28
Cultivo Agrícola - Banana	3,23	323,46	3,91
Cultivo Agrícola - Café	1,53	152,84	1,85
Cultivo Agrícola - Coco Bahia	0,43	43,15	0,52
Edificação	1,99	199,34	2,41
Jaqueira	0,14	13,58	0,16
Macega	1,27	126,52	1,53
Massa D'Água	0,67	67,43	0,81
Mata Nativa	42,09	4209,17	50,82
Outros Cultivos Agrícolas Anuais	1,06	106,06	1,28
Pastagem	26,74	2674,15	32,29
Silvicultura	0,51	51,03	0,62
Solo Exposto	0,41	40,91	0,49
Total	82,82	8282,28	100,00

Fonte: elaborado pelo autor (2022).

Os Cultivos Agrícolas (Banana, Café, Coco, Silvicultura, Jaqueira e Outros Cultivos anuais, identificados em azul na tabela 13), que em 1970 ocupavam 6,76km² ou 8,15% tiveram um leve aumento, e no ano de 2012, quando somados, passaram a ocupar 6,90km² ou 8,33% da área de Duas Bocas, um incremento de 2,07% em relação ao índice prévio. Destas quatro classes, a mais predominante é a de Banana, representando 3,23km², ou, 46,81% do total de terras destinadas à agricultura na área de estudo, e a menos expressiva é a de Jaqueira, com 0,14km² ou 2,03% do total das áreas de cultivo agrícola, que é considerada uma espécie invasora de antigas propriedades rurais que antes se localizavam em território atualmente pertencente a Rebio (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2020).

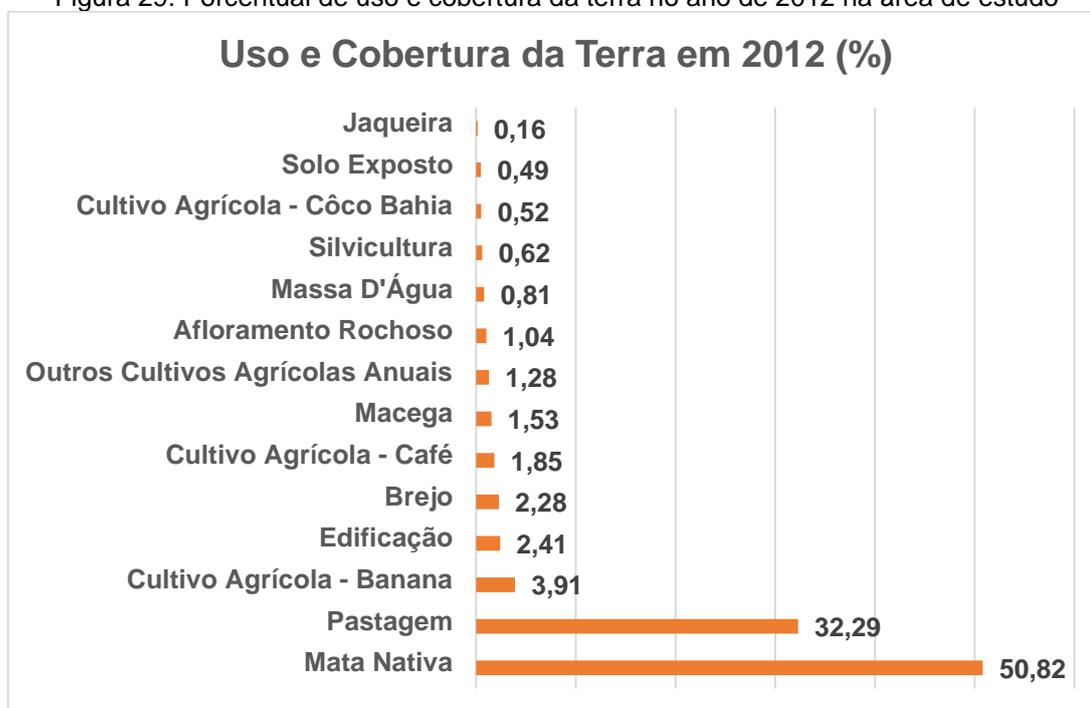
A classe de Pastagem, no ano de 2012, é a segunda mais presente na área da bacia hidrográfica, sendo referente a 26,74 km² ou 32,29% dos 82,82km² de extensão. O aumento dessa classe foi da ordem de 45,94% em relação ao valor previamente utilizado por tal classe, que antes era de 17,98km² ou 21,70% do total da bacia. A justificativa para esse aumento é dada pela substituição do uso da classe Macega, que, embora tenha se regenerado em alguns pontos e se integrou à classe de Mata

Nativa, em outros, mais afastados da Rebio de Duas Bocas, foi alterada para dar lugar a novos campos de vegetação rasteira.

Já a classe de Edificação, que estava presente em 1,99km² ou 2,41% da área da bacia, apresentou um aumento de 107% ante os valores registrados para o ano de 1970, de 0,96km² e 1,16%. Embora não seja um valor absoluto elevado, isso indica que no intervalo de 52 anos a malha urbana mais que dobrou, em especial na área meridional da bacia.

Os Brejos, que antes representavam 3,54km² ou 4,28% da área total sofreram uma diminuição significativa, passando a estar em apenas em 1,89km² ou 2,28%, uma redução de 46,61%. A maior parte das perdas nessa classe de uso e cobertura da terra se deve ao avanço das pastagens, que foram introduzidas nas partes mais a leste da bacia, onde se situam as planícies de inundações. A Figura 29 exibe o percentual de cada classe de uso e cobertura da terra para o ano de 2012.

Figura 29: Porcentual de uso e cobertura da terra no ano de 2012 na área de estudo



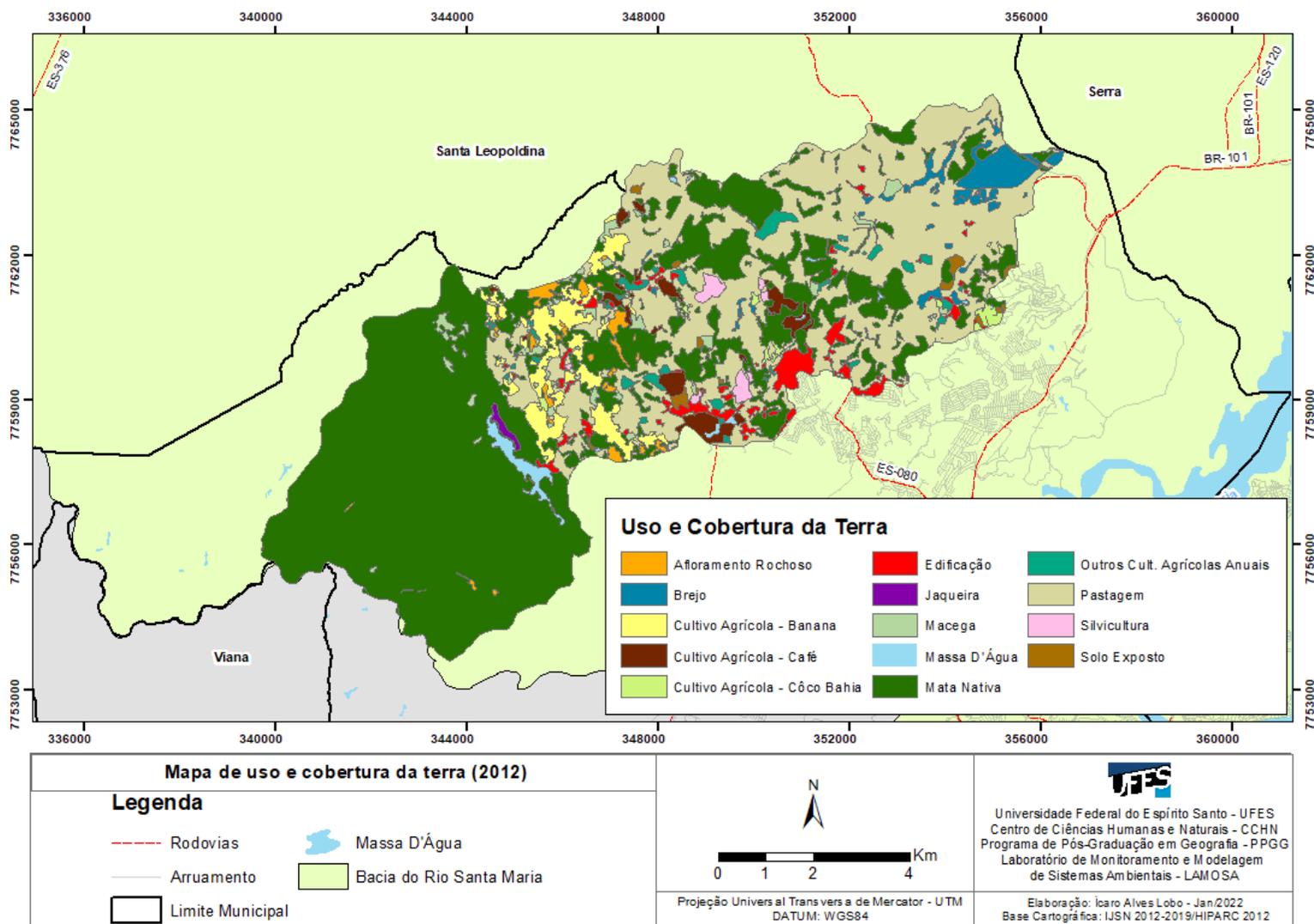
Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Por sua vez, a área que representa a classe de Solo Exposto também sofreu uma diminuição, sendo representada por 0,41km² ou 0,49% da área da bacia no ano de 2012, em comparação com os valores de 2,84km² ou 3,43%, uma queda de 85,56%, indicando uma menor incidência de regiões suscetíveis ao máximo potencial erosivo devido à ausência de proteção dos solos.

Outras classes, como a de Afloramento Rochoso, que passou de 0,30km² ou 0,36% para 0,86km² ou 1,04% tem seu aumento justificado pela diferença nos métodos de classificação entre os dois períodos, já que o vetor de uso e cobertura da terra utilizado para o ano de 1970 é oriundo de fotografias aéreas de qualidade inferior as imagens que foram a fonte de vetorização para o mapa de igual classificação referente ao ano de 2012 (SANTOS, 2016) e que seria adaptado posteriormente para contemplar os novos limites da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas.

As Massas de Água, que em 2012 representavam 0,67km² ou 0,81% do total não sofreram alteração significativa, considerando que representavam os mesmos índices na década de 1970. Conforme explicação prévia, esse volume hídrico se apresenta na bacia hidrográfica de maneira mais significativa na área represada pela barragem situada na Rebio, além de pequenos açudes, lagos e barragens que estão presentes nos sítios e fazendas dispostos ao longo de toda a extensão da área de estudo. A Figura 30 exhibe os distintos usos e coberturas da terra em Duas Bocas no ano de 2012.

Figura 30: Mapa de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 2012.



Fonte:Elaborado pelo autor (2022), com base no mapa disponibilizado pelo IJSN (2012)..

6.5.4) Perda de solo para o ano de 2012

Para o ano de 2012, a perda de solo foi determinada utilizando os mesmos critérios e metodologia empregados para o ano de 1970. A Tabela 14 apresenta os graus de erosão hídrica e seus respectivos percentuais

TABELA 14: VALORES DE PERDA DE SOLO POR EROÇÃO HÍDRICA CALCULADOS PELA EUPS EM 2012

Perda de solo (t/ha.ano)	Grau de erosão hídrica	Área (%)	Área (km ²)
< 1	Tolerável	14,13	11,71
1 - 10	Baixo	17,69	14,65
10 - 50	Moderado	50,83	42,10
50 - 200	Elevado	12,85	10,64
> 200	Muito Elevado	4,49	3,72
Total		100,00	82,82

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O grau de erosão hídrica que prevaleceu em 2012 foi o Moderado, que ocupava 50,83% da área total da bacia, ou 42,10km². Tal índice pode ser encontrado em toda a extensão territorial da bacia, mas se manifesta de maneira mais realçada em duas zonas: nos 2910 hectares da Rebio Duas Bocas e no compartimento de transição entre as áreas mais elevadas da bacia e a planície de inundação. De igual maneira, as perdas por erosão hídrica de grau Moderado foram identificadas em todas as classes de solo, porém, as que mais se destacam são a Associação entre Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico, Cambissolo Háplico, Neossolo Litólico e Latossolo Amarelo. No caráter geomorfológico, esse grau de perdas é observado em todas as unidades, com exceção das Planícies Costeiras, Estuários e Praias. O valor do fator topográfico para esse índice de perda de solos tende a ser superior a 5, indicando que um relevo mais declivoso e de comprimentos de encosta mais compridos influi diretamente no aumento da erosão hídrica.

No que tange o índice de erosividade pelas chuvas, seus valores incluem todos os listados para a área de estudos, que é sempre superior a 10397,41 MJ.mm/ha.ano, valores considerados muito elevados de acordo com Carvalho (1994). O uso e

cobertura da terra é bastante diversificado, entretanto, destacam-se a Mata Nativa e Pastagem, mas também se observa a Silvicultura de maneira bem menos impactante.

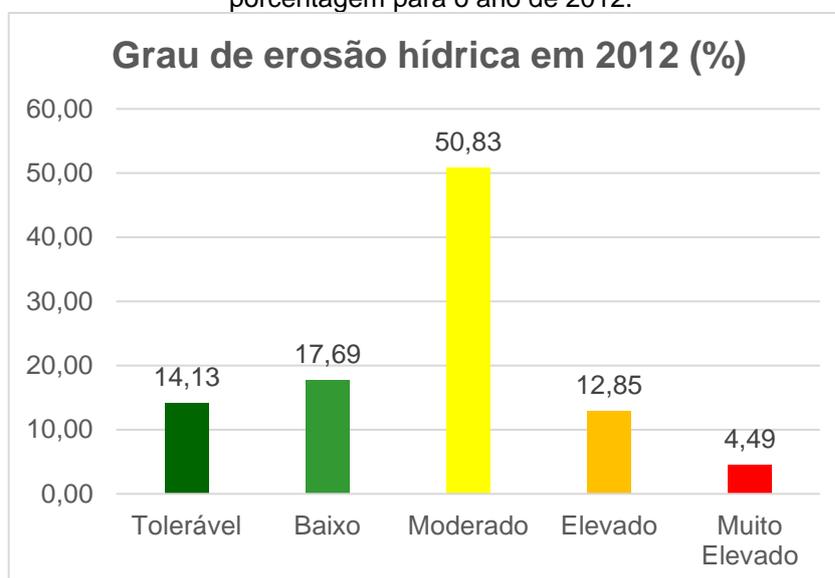
A perda de solo considerada Tolerável se encontra em 11,71km² ou 14,13% da área da bacia. Esse índice é mais perceptível na região oriental de Duas Bocas, no Sul e em pequenas manchas do compartimento central, além dos corpos hídricos. As classes de solo que mais contém esse potencial erosivo são o Gleissolo Háplico e o Argissolo Amarelo. Em termos geomorfológicos, as Unidades contempladas por tal grau de perdas são as Planícies Costeiras em toda sua extensão, além da porção meridional das Colinas e Maciços Costeiros. O fator topográfico, por sua vez, varia entre 0,03 e não supera o valor de 10, indicando que o relevo tende a ser mais plano e o gradiente de declividade é pouco amplo.

Ao considerar o índice de erosividade pelas chuvas, os valores mais identificados estão na faixa entre 10397,41 e 12021,22 MJ.mm/ha.ano, estando entre os patamares inferiores e moderados para esse indicador para a área de estudo. Quanto ao uso e cobertura da terra, as variáveis identificadas de maneira mais evidente incluem as áreas de Brejo, Edificação, Corpo d'Água, Pastagem e Afloramento Rochoso. Conforme mencionado previamente, algumas dessas coberturas possuem fator C igual a zero, uma vez que não permitem a erosão dos solos, enquanto que outras são afetadas por índices de precipitação menos elevados, por uma erodibilidade do solo demasiado baixa ou fator topográfico insignificante, assegurando uma condição de estabilidade ou perdas inferiores à capacidade natural de regeneração do solo.

O índice de perdas de solo denominado Baixo é observado em 14,65km² ou 17,69% da área total da bacia. É percebido com mais facilidade na metade leste da área de estudo, tanto na região norte quanto na austral, a partir da transição da zona de relevo mais montanhoso rumo à planície de inundação. Pedologicamente, as classes que apresentam esse indicador de erosão são o Latossolo Amarelo e o Argissolo Amarelo. Em relação à geomorfologia, o índice Baixo é visualizado de maneira mais destacada ao longo de toda a Unidade Colinas e Maciços Costeiros Capixabas. O fator topográfico varia entre 0,03 e 5, demonstrando pouca variação de gradiente topográfico e de declividade e relevos menos íngremes.

Ao tratar do índice de erosividade pelas chuvas, os valores característicos para a erosão hídrica de nível baixo estão nos menores patamares da bacia, entre 10397,41 e 12021,22 MJ.mm/ha.ano. Por sua vez, o uso e cobertura da terra para essa escala de perdas de solo é variado, contendo Pastagem, Macega e Mata Nativa, esta última em regiões pontuais dentro da Rebio de Duas Bocas. A Figura 31 representa de maneira gráfica a divisão da área total da bacia de acordo com as classes de perda de solo.

Figura 31: Indicador do grau de erosão hídrica para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, em porcentagem para o ano de 2012.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

O grau de erosão hídrica Elevado, disponível em 12,85% ou 10,64km² é o segundo menos comum para o ano de 2012, sendo encontrado de maneira majoritária nas porções centro-ocidental e oeste da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas. Os solos que mais são afetados por esse nível erosivo são o Argissolo Amarelo, em sua porção oeste, o Cambissolo Háplico, por toda sua distribuição, e boa parte da zona de Associação entre Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico (2013). Em termos de geomorfologia, as Unidades que contém esse grau de erosão hídrica são os Patamares Escalonados do Sul Capixaba, de maneira uniforme, além da zona de contato entre essa Unidade e a de Colinas e Maciços Costeiros Capixabas (IJSN, 2012). Quanto ao fator topográfico, este varia, principalmente 10 a valores superiores

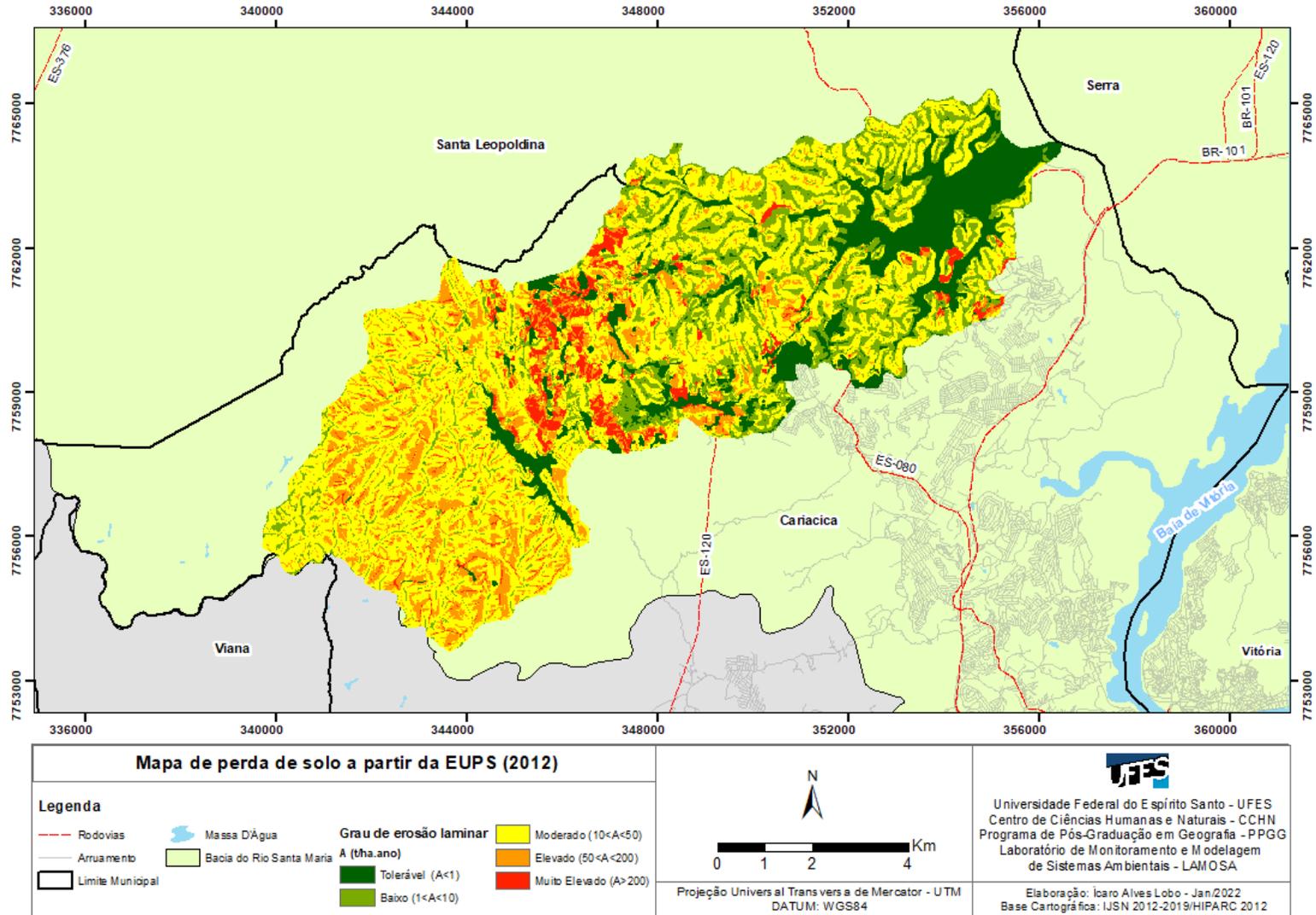
a 50, indicando um gradiente de declividade de médio a muito elevado, além de comprimentos de encosta igualmente de grande variação, além de relevos ondulados a escarpados.

Quando se observa o índice de erosividade das chuvas para as perdas de solo entre 50 a 200 toneladas por hectare ao ano é possível perceber que os valores estão entre 11528,84 a 13068, MJ.mm/ha.ano, sendo considerados valores intermediários a muito elevados para a área de estudo, o que condiz com o volume de perdas de solo por erosão hídrica contemplado pelo grau Elevado, que é deflagrado por eventos de precipitação. O uso e cobertura da terra identificado para esse patamar erosivo foi o de Cultivos Agrícolas, em especial de Banana, Café e Outros. A presença da Cultura de Jaqueira, situada dentro da Rebio é considerada uma espécie invasora também pertence a esse grau de perdas de solo, e sua substituição é considerada um desafio para o Plano de Manejo da Reserva Biológica de Duas Bocas (ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2020). De maneira menos expressiva, também se percebe a presença de perda Elevada na cobertura de Mata Nativa, especialmente nas áreas de maior declividade dentro da Rebio, bem como sob a cobertura de Silvicultura, que nesse ano não teve sua espécie discriminada.

Por fim, o grau de erosão hídrica Muito Elevado, que corresponde a 4,49% ou 3,72% da área total da bacia pode ser encontrado em duas regiões: no compartimento central, que separa a Rebio do princípio do relevo mais plano e, de forma menos expressiva, nas partes mais ao sul da área de estudo, de maneira descontínua. As classes pedológicas que podem sofrer com esse patamar erosivo são o Cambissolo Háplico, em toda sua porção oriental, alguns pontos do Latossolo Amarelo, em especial na área de contato com o Cambissolo Háplico, o Neossolo Litólico na sua distribuição mais à leste, em contato com o Cambissolo Háplico, além da porção do Argissolo Amarelo situada a sul do Gleissolo Háplico. As Unidades Geomorfológicas contendo perdas de grau Muito Elevado são a porção leste dos Patamares Escalonados do Sul Capixaba e a zona de contato entre as Colinas e Maciços Costeiros Capixabas com a Unidade anterior. Em relação ao fator topográfico, seus valores variam entre 10 a acima de 50, indicando relevos moderadamente ondulados a altamente escarpados e elevado gradiente de declividade.

Para os valores de erosividade das chuvas, os valores encontrados para as perdas de grau Muito Elevado variaram entre 11067,89 a 12524,08 MJ.mm/ha.ano, indicando que, para o índice pluviométrico da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, a erosividade é moderada, apesar de ser considerada muito elevada de acordo com a escala de Carvalho (1994) para o Brasil. Já o uso e a cobertura da terra englobam desde todos os tipos de Cultura Agrícola, em especial Banana e Coco Bahia, este último identificado apenas neste grau erosivo, passando por áreas menores de Jaqueira identificadas dentro da Rebio, além dos Solos Expostos, que são os maiores contribuintes para a erosão hídrica por não terem nenhum grau de proteção contra os efeitos das gotas de chuva. A Figura 32 apresenta a disposição espacial de cada classe de perda de solo na região de estudo.

Figura 32: Mapa de perda de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas no ano de 2012.



Fonte:Elaborado pelo autor (2022).

6.5.5) Uso e Cobertura da Terra em 2019

Estão dispostas na Tabela 15 as classes de uso e cobertura da terra identificadas a partir da fotointerpretação das imagens capturadas pelos satélites KOMPSAT 3 e KOMPSAT 3A.

TABELA 15: ÁREA EM KM² E HECTARE E PERCENTUAL DAS CLASSES DE USO E COBERTURA DA TERRA PARA O ANO DE 2019 DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DUAS BOCAS COM REALCE PARA CLASSES AGRÍCOLAS EM AZUL E DE MATA NATIVA EM VERMELHO

Classe de Uso e Cobertura da Terra (2019)	Área (km²)	Área (ha)	%
Afloramento Rochoso	1,02	101,95	1,23
Área Edificada	0,61	60,54	0,73
Brejo	2,55	255,28	3,08
Cultivo Agrícola - Banana	2,72	271,65	3,28
Cultivo Agrícola - Café	0,52	52,46	0,63
Cultivo Agrícola - Cana-De-Açúcar	0,05	5,30	0,06
Cultivo Agrícola - Coco-Baía	0,30	30,28	0,37
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Permanentes	0,22	22,04	0,27
Cultivo Agrícola - Outros Cultivos Temporários	0,35	34,88	0,42
Extração Mineração	0,04	3,88	0,05
Macega	1,15	114,70	1,39
Massa D'Água	0,98	98,49	1,19
Mata Nativa	39,44	3944,11	47,63
Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração	4,07	407,32	4,92
Outros	2,43	243,48	2,94
Pastagem	24,89	2488,58	30,05
Reflorestamento - Eucalipto	0,23	22,72	0,27
Reflorestamento - Seringueira	0,21	20,80	0,25
Solo Exposto	1,02	102,43	1,24
Total	82,81	8280,90	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para efeitos comparativos dos usos e cobertura da terra entre os três períodos históricos, as classes que em 2019 estavam separadas foram destacadas, com as classes de Reflorestamento e Outros Cultivos Agrícolas sendo agregadas às demais de Cultivo Agrícola (cor azul na tabela 15), bem como a divisão entre Mata Nativa e Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração sendo unida em um só valor (cor vermelha na tabela 15).

Assim, a classe mais significativa para o ano de 2019 é a de Mata Nativa como um todo, recobrando 43,51km² ou 52,55% da área de estudo, um aumento de 3,37% em relação à cobertura do ano de 2012.

Em seguida, como segunda classe mais representativa de uso e cobertura da terra para o ano de 2019 está a Pastagem, com 24,89km² ou 30,05% da extensão territorial de Duas Bocas, indicando uma diminuição de 6,92% em relação a cobertura de 26,74km² de 2012. Um dos motivos para essa diminuição foi a construção da Rodovia ES-120, denominada Almir Rodrigues Laranja e popularmente conhecida como Contorno de Aroaba, com extensão de 9,7km e inauguração realizada em dezembro de 2018, sendo classificada no ano de 2019 com o uso Outros, juntamente com demais construções de difícil identificação por fotointerpretação e que ocupa 2,43km² ou 2,94% da área de Duas Bocas.

A soma de todos os Cultivos Agrícolas e Reflorestamentos resultou em uma cobertura do solo de 4,60km² ou 5,55% do território. Quando comparado com os 6,76km² ou 8,15% registrados em 2012, a redução foi da ordem de 31,95%. A explicação para essa redução é dada pelo crescimento das áreas de Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração que muitas vezes passaram a substituir algumas culturas agrícolas, além da expansão da classe Solo Exposto, que no ano de 2019 cresceu 148,78% e preenchia 1,02km² ou 1,24% ante 0,41km² ou 0,49% identificados em 2012. Dentre as classes identificadas de Cultivo Agrícola, permanece o destaque para a cultura de Banana, ocupando 2,72km² ou 3,28% da área total da bacia, um decréscimo de 15,79% em comparação a 2012.

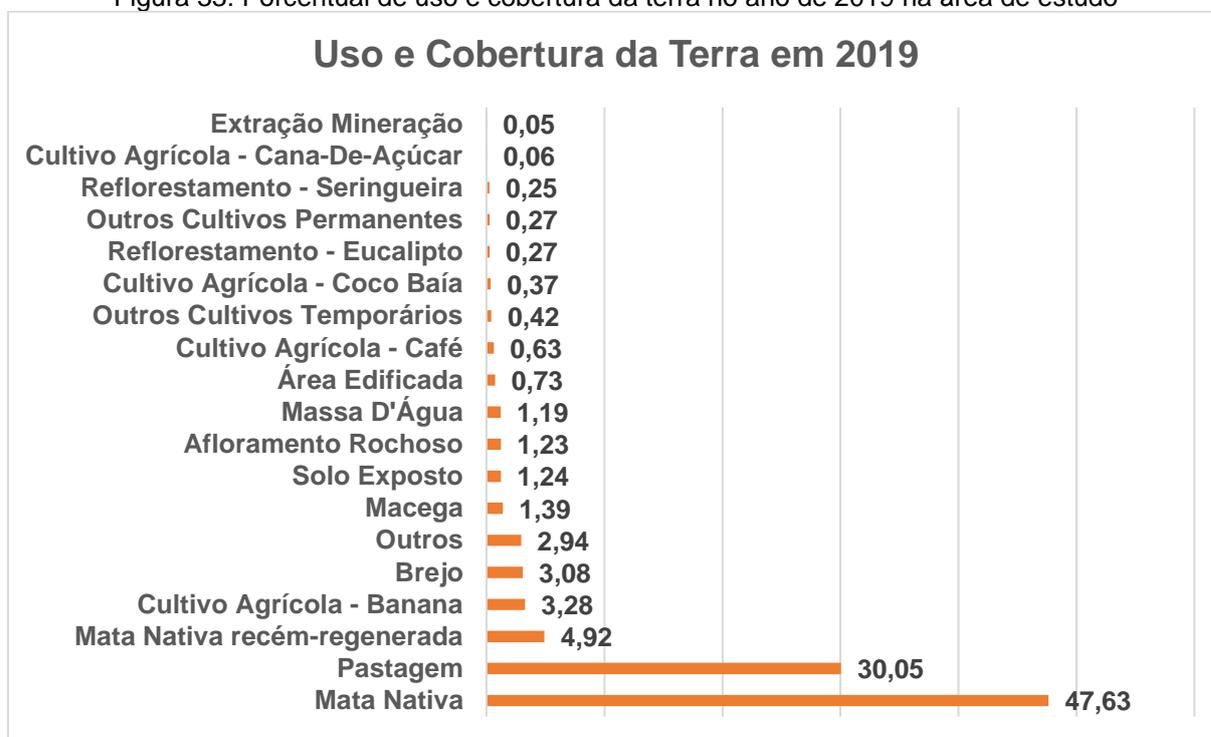
Para a classe de Brejo, que foi alocada para 1,89km² ou 2,28% em 2012, curiosamente, houve um aumento de 34,92%, e nos registros de 2019 era responsável por 2,55km² ou 3,08% da área total de Duas Bocas. O crescimento dessa classe se deu em detrimento da redução de áreas de pastagens, indicando que as imagens de 2012 da porção oriental da bacia podem ter sido capturadas durante a estação seca e as de 2019 no período úmido, resultando em distintas classificações para os mesmos territórios, sendo a mais recente mais fidedigna com as condições observadas *in situ* durante as coletas de amostras, o que pode ser corroborado pelo mapeamento dos solos e a distribuição do Gleissolo em Duas Bocas, que é mais condizente com as imagens mais atuais. A diferença das estações também reflete na

quantidade de Massa d'Água identificada, que aumentou de 0,67 para 0,81km² entre 2012 e 2019.

As áreas de Macega, que recobriam 1,27km² ou 1,53% da terra em 2012, sofreram leve diminuição, de 9,45%, e, sete anos depois, passavam a representar 1,15km² ou 1,39%. Essa pequena redução é justificada pelo aumento das áreas de Mata Nativa em Estágio Inicial de Recuperação.

Uma classe que merece atenção é a de Afloramento Rochoso, que cresceu de 0,86km² ou 1,04% para 1,02km² ou 1,23%, um incremento de 20,93% em apenas 7 anos. O aumento se deu, principalmente, em áreas de Cambissolo Háplico previamente cobertas por Mata Nativa, indicando um possível desmatamento e aumento dos processos erosivos laminares. Outra possibilidade se refere ao aumento da precisão dos dados em comparação com as imagens anteriores da região. A Figura 33 contém um gráfico que dispõe o percentual de uso e cobertura da terra em 2019.

Figura 33: Porcentual de uso e cobertura da terra no ano de 2019 na área de estudo

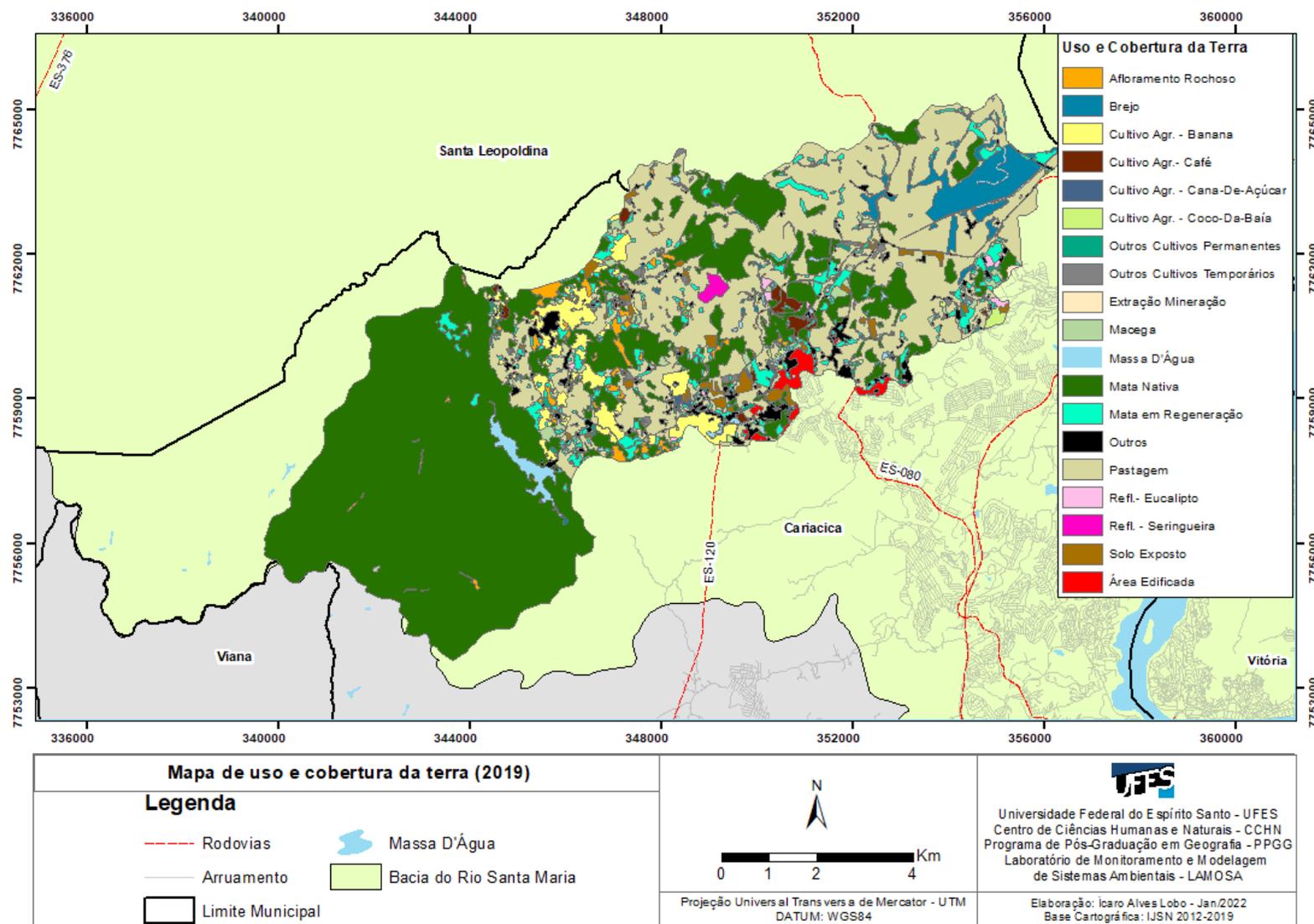


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Também merece destaque a diminuição da identificação da classe Área Edificada, que se distribuía por 1,99km² no ano de 2012 e passou a representar meros 0,61km² em 2019. Ao contrário do que se indica, não houve processo de regressão da urbanização, mas sim, boa parte dos itens que a constituíam foi migrado para a classe Outros, de 2,43 km².

Houve a introdução da classe Extração Mineração, que é a menos significativa para o ano de 2019, sendo distribuída por 0,04km² ou 0,05% da área de estudo. Embora seja pouco expressiva e esteja situada numa área previamente identificada como Solo Exposto, é interessante observar como essa utilização do solo irá evoluir nos próximos anos, tendo em vista que pode acelerar grandemente os processos erosivos. A Figura 34 exibe a área de cada um dos distintos usos e coberturas da terra no ano de 2019.

Figura 34: Mapa de uso e cobertura da terra para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas no ano de 2019.



Fonte:Elaborado pelo autor (2022).

6.5.6) Perda de solo para o ano de 2019

Como pode ser verificado na Tabela 16 e Figura 34, o grau de erosão hídrica mais representativo para o ano de 2019 é o Moderado, aparecendo em 40,11 km² ou 48,44% da área da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas. Seu predomínio ocorre na porção mais a oeste, onde é encontrada a Rebio homônima a bacia. No entanto, também ocorre de maneira significativa nas seções norte e nordeste da área de estudo.

TABELA 16: VALORES DE PERDA DE SOLO POR EROSÃO HÍDRICA CALCULADOS PELA EUPS EM 2019

Perda de solo (t/ha.ano)	Grau de erosão hídrica	Área (%)	Área (km ²)
< 1	Tolerável	14,28	11,82
1 - 10	Baixo	19,39	16,05
10 - 50	Moderado	48,44	40,11
50 - 200	Elevado	12,45	10,31
> 200	Muito Elevado	5,45	4,51
Total		100,00	82,81

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Em relação a geomorfologia, o grau Moderado é o predominante de todos os compartimentos da região, com exceção das Planícies Litorâneas (IJSN, 2012). Seu fator topográfico geralmente é baixo a moderado, variando entre 5 a 15, refletindo em níveis de declividade pouco acentuados e relevos com pouca variação de ondulação. Se destacam como uso e cobertura da terra a Mata Nativa, Pastagem, Macega e Reflorestamento por Seringueira.

Quando a distribuição desse patamar erosivo é comparada com a pedologia local é possível perceber que ela acontece de maneira expressiva em todas as classes de solo, com exceção do Gleissolo Háplico, e de maneira mais moderada na área de Argissolo Amarelo (EMBRAPA, 2013). Por sua vez, a erosividade da chuva também irá englobar todos os valores disponíveis para a região de Duas Bocas, no entanto, os que se sobressaem são os mais elevados, entre 12021,22 e 13068,84 MJ.mm/ha.ano.

Ao se analisar o índice de perdas Tolerável, que representa os menores níveis de perda de solo na região, é possível perceber que o mesmo se estende por 11,82 km² ou 14,28% dos 82,81km² de área da bacia. Sua distribuição é dada nas porções mais a leste de Duas Bocas, bem como em áreas descontínuas ao sul da bacia e na região centro-leste, além de uma presença significativa dentro do território da Rebio, representado pelo volume hídrico represado pela barragem do Rio Duas Bocas.

A partir dos critérios geomorfológicos, sua presença é mais detectada em duas Unidades: nas Planícies Costeiras, Estuários e Praias, e, de maneira pontual, em regiões isoladas das Colinas e Maciços Costeiros Capixabas. No contato entre esta última Unidade e os Patamares Escalonados do Sul capixaba, também há pequenos pontos de perdas de grau Tolerável (IJSN, 2012). Está sempre associado a valores baixos de fator topográfico, entre 0,03 e 5, indicando relevos de ondulação tímida ou planos, com exceção dos pontos com uso e cobertura da terra classificados como Afloramento Rochoso, onde o relevo apresenta características montanhosas e tem elevados índices de fator LS, mas não sofre erosão pela ausência de solo. Entre os usos mais comuns da terra para esse grau de erosão hídrica estão os Afloramentos Rochosos, Brejo, Pastagem, Massa d'água, e parte das Áreas edificadas e da classe Outros.

Concernente as classes de solos mais presentes para o grau de erosão hídrica Tolerável, destaca-se o Gleissolo Háplico, cuja maior parte de sua extensão encontra-se enquadrada nesse patamar erosivo. Contudo, áreas expressivas de Argissolo Amarelo, em sua porção oriental, e Latosssolo Amarelo, também se encontram nesta zona de perdas de solo (EMBRAPA, 2013). A erosividade da chuva, por sua vez, varia entre 10397,41 a 12021,22 MJ.mm/ha.ano, que são valores baixos a moderados para a bacia.

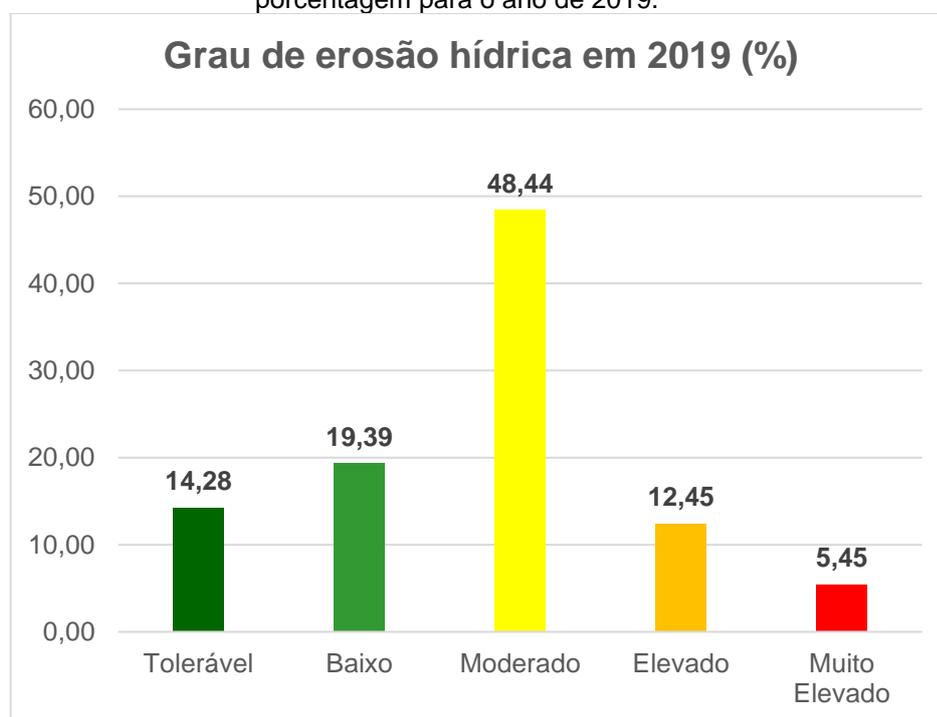
Por sua vez, o grau de erosão hídrica Baixo esteve presente em 19,39% ou 16,35km² da área de estudo, sendo mais facilmente observado no extremo sul da bacia, além das zonas centro-leste e nordeste.

A Unidade Geomorfológica que mais demonstrou esse patamar erosivo foi a denominada Colinas e Maciços Costeiros Capixabas, ao longo de toda sua extensão territorial (IJSN, 2012). A amplitude do fator topográfico é moderada, indo de 0,03 até

10, indicando um relevo que varia de formações mais planas até levemente onduladas, com baixo gradiente de declividade. O uso e cobertura da terra é constituído principalmente por Pastagem, Mata Nativa em Estágio Inicial de Regeneração e Macega.

Para os solos, foi diagnosticado que as classes mais afetadas pelas perdas de solo por erosão hídrica de grau Baixo são o Latossolo Amarelo em toda sua extensão e o Argissolo Amarelo, em sua zona de contato com a classe anterior e o Cambissolo Háplico. Ao se relacionar o fator de erosividade das chuvas, a distribuição da erosão hídrica de grau Baixo ocorre de maneira mais notória nas zonas entre 10397,41 a 12021,22 MJ.mm/ha.ano, abrangendo os valores baixos a intermediários da bacia hidrográfica. A Figura 35 contém a divisão percentual das classes de erosão para a área de estudo no ano de 2019.

Figura 35: Indicador do grau de erosão hídrica para a bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, em percentagem para o ano de 2019.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O índice de perda de solo anual denominado Elevado, que ocorre entre 50 a 200 toneladas por hectare, foi identificado em 12,45% ou 10,31km² da bacia, situados em

sua porção mais oriental, ao longo de toda Rebio, além do compartimento de transição central entre os relevos mais montanhosos e as áreas mais planas.

Esse grau de erosão hídrica foi encontrado nos compartimentos geomorfológicos Patamares Escalonados do Sul Capixaba e no contato desse compartimento com o denominado Colinas e Maciços Costeiros Capixabas. O fator topográfico varia entre 10 até valores acima de 50, indicando diversas formas de relevo para esses níveis de perda, de ondulados até fortemente escarpados e grande variação do gradiente de declividade. Quanto ao uso e cobertura da terra, os que se sobressaem são a cobertura por Mata Nativa, diversas formas de Cultivo Agrícola, em especial Café, Banana, Cana-de-Açúcar, Coco-Bahia, Outros, além do Reflorestamento por Eucalipto e da Extração por Mineração.

Em relação à pedologia, as classes de solo mais presentes no grau Elevado são Cambissolo Háplico e Associação entre Latossolo Amarelo e Cambissolo Háplico, por toda sua extensão, além do Argissolo Amarelo, com presença mais acentuada na extremidade sul e de forma dispersa e menos perceptível na área ocupada por Latossolo Amarelo. Os valores de erosividade das chuvas para a distribuição desse grau erosivo estão concentrados em índices entre 11528,84 a 13068,84 MJ.mm/ha.ano, sendo considerados elevados para a área de estudo.

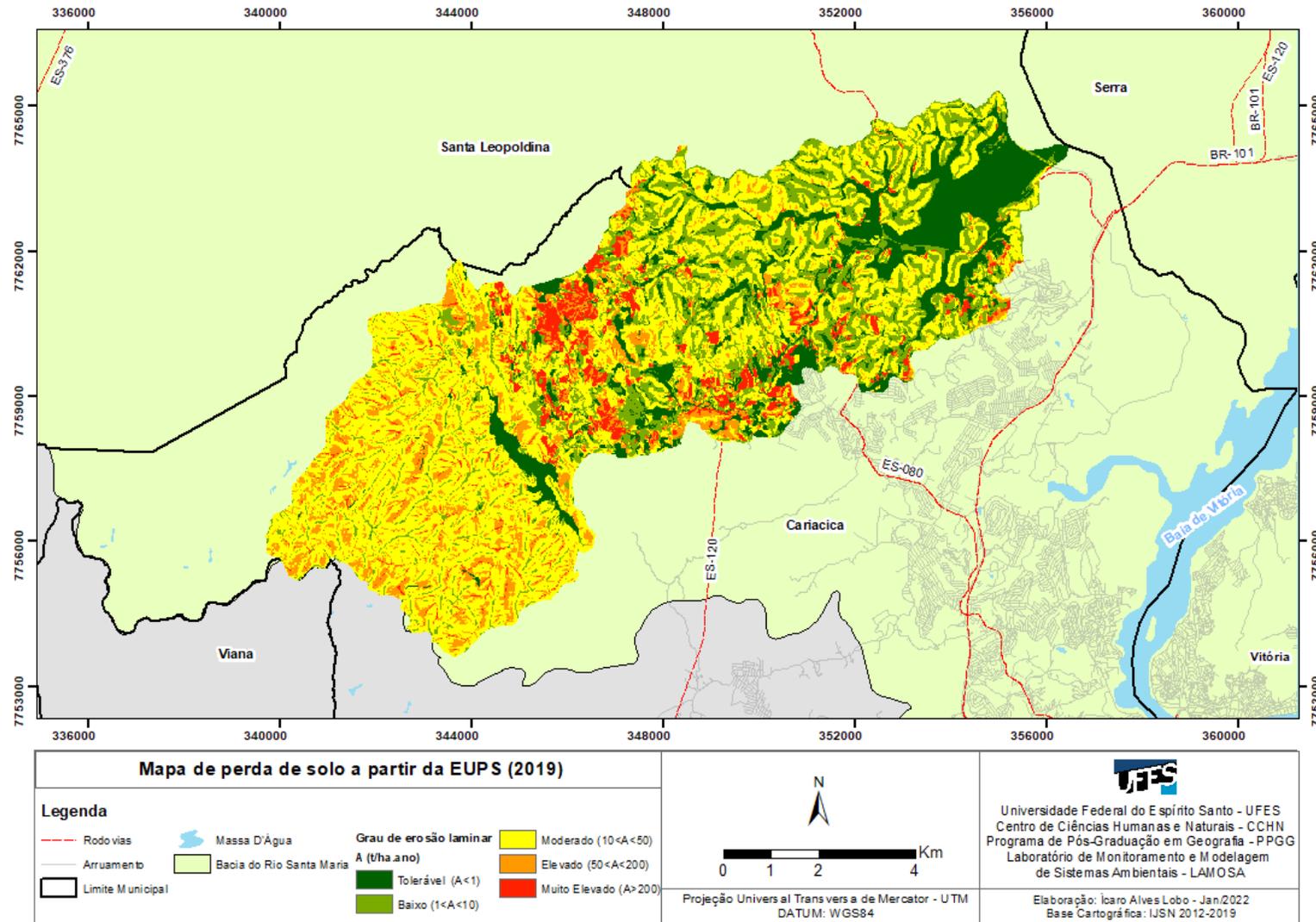
A distribuição do grau de erosão Muito Elevado ocorre em 5,45% da área total ou 4,51km². Esse índice é percebido de maneira mais evidente em pequenas manchas dispersas ao longo da região central, quase sempre acompanhadas das perdas de nível Elevado, bem como na porção meridional da bacia de maneira intermitente.

O grau de erosão Muito Elevado encontra-se nos compartimentos geomorfológicos Patamares Escalonados do Sul Capixaba, em sua extremidade leste, e nas Colinas e Maciços Costeiros Capixabas, na sua porção mais ocidental e austral. Curiosamente, seu fator topográfico contempla todos os valores disponíveis, porém, predominam os superiores a 10, o que indica relevos de baixa ondulação até configurações montanhosas e escarpadas. O uso e cobertura da terra é majoritariamente formado por regiões de Solo Exposto, Cultivos Agrícolas de Banana e Café em maior destaque, mas também inclui cultivos agrícolas de Coco Bahia e Cana-de-Açúcar e também as culturas não identificadas, nomeadas Outros Cultivos Agrícolas e divididas em

Temporários e Permanentes, além da classe Outros, que indica desde trechos de expansão da malha urbana, estradas de terra ou pavimentadas, além de quaisquer usos que não foram precisados a partir da fotointerpretação das imagens de satélite.

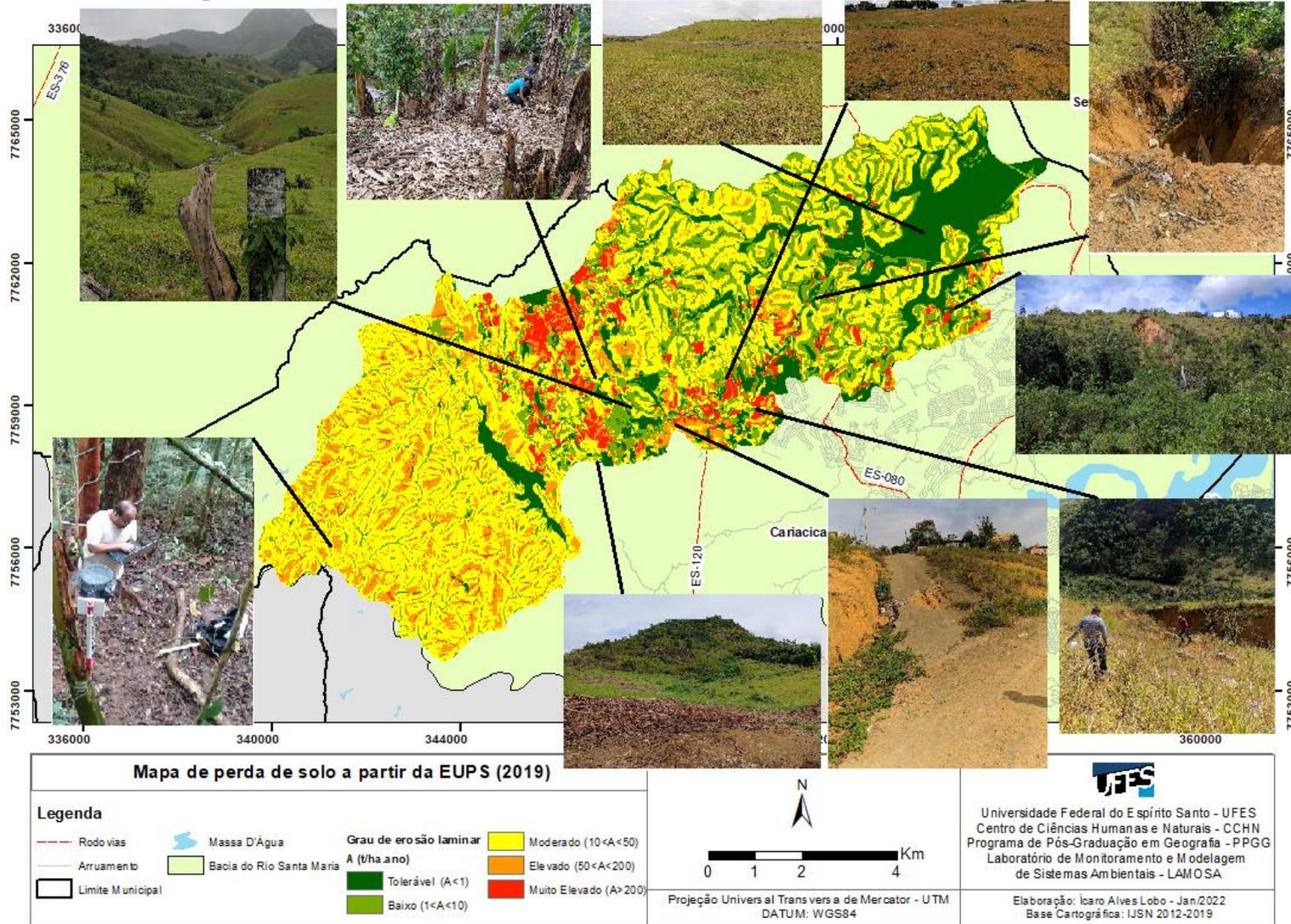
As classes de solo que abrigam pontos desse nível de erosão hídrica são os Cambissolos Háplicos em sua extremidade mais a leste, além de uma presença pouco expressiva em pontos de Argissolo Amarelo, Neossolo Litólico e de Latossolo Amarelo. Para a distribuição dos valores de erosividade das chuvas, os valores encontrados encontram-se na faixa intermediária dos registrados em Duas Bocas, entre 11067,89 a 12524,08 MJ.mm/ha.ano. A Figura 36 representa a disposição territorial de cada classe de perda de solo em Duas Bocas no ano de 2019. A Figura 37, por sua vez, contém a sobreposição das perdas de solo com exemplos de usos distintos de cobertura da terra na região.

Figura 36: Mapa de perda de solos para a Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas no ano de 2019.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022),

Figura 37: Perda de solos e uso e cobertura da terra identificados em campo no ano de 2019.



Fonte:Elaborado pelo autor (2022),

6.7) Comparativo entre a distribuição da perda de solo nos anos de 1970, 2012 e 2019.

A partir das análises realizadas para cada período histórico, é possível estabelecer um paralelo da evolução da perda de solo por erosão hídrica na região de Duas Bocas. A Tabela 17 representa de maneira sintetizada os índices erosivos e sua participação ao longo do tempo.

TABELA 17: COMPARATIVO ENTRE OS GRAUS DE PERDA DE SOLO PARA OS ANOS DE 1970, 2012 E 2019 UTILIZANDO A ERODIBILIDADE DISPONIBILIZADA EM TRABALHOS PRÉVIOS E A CALCULADA EM LABORATÓRIO POR MÉTODO INDIRETO

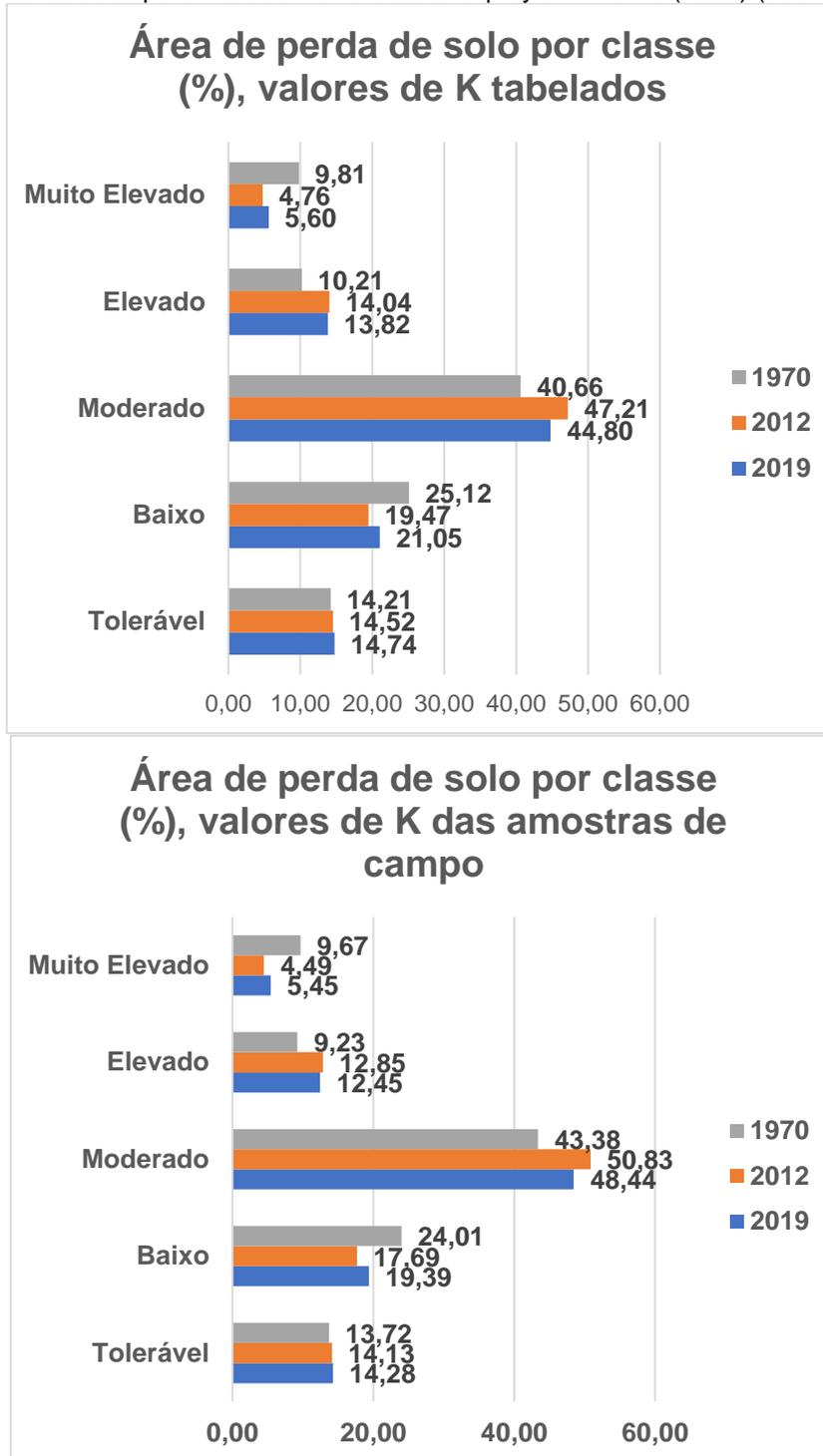
1970						
Grau de erosão laminar	K tabelado		K método indireto		Diferença (tab-ind)	
	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)
Tolerável	14,21	11,77	13,72	11,37	-0,49	-0,41
Baixo	25,12	20,81	24,01	19,89	-1,11	-0,92
Moderado	40,66	33,69	43,38	35,94	2,72	2,26
Elevado	10,21	8,46	9,23	7,65	-0,98	-0,81
Muito Elevado	9,81	8,13	9,67	8,02	-0,13	-0,11
Total	100,00	82,86	100,00	82,86	0,00	0,00
2012						
Grau de erosão laminar	K tabelado		K método indireto		Diferença (tab-ind)	
	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)
Tolerável	14,52	12,03	14,13	11,71	-0,39	-0,32
Baixo	19,47	16,12	17,69	14,65	-1,78	-1,47
Moderado	47,21	39,10	50,83	42,10	3,62	3,00
Elevado	14,04	11,63	12,85	10,64	-1,19	-0,99
Muito Elevado	4,76	3,94	4,49	3,72	-0,27	-0,22
Total	100,00	82,82	100,00	82,82	0,00	0,00
2019						
Grau de erosão laminar	K tabelado		K método indireto		Diferença (tab-ind)	
	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)
Tolerável	14,74	12,21	14,28	11,82	-0,47	-0,39
Baixo	21,05	17,43	19,39	16,05	-1,66	-1,38
Moderado	44,80	37,09	48,44	40,11	3,65	3,02
Elevado	13,82	11,44	12,45	10,31	-1,37	-1,13
Muito Elevado	5,60	4,64	5,45	4,51	-0,15	-0,12
Total	100,00	82,81	100,00	82,81	0,00	0,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A partir dos dados dispostos, verifica-se que a variação das áreas para cada grau de perda de solo foi baixa, com a maior diferença em valores totais ocorrendo no ano de 2019 para o Grau Moderado, sendo de 3,65% de área total ou 3,02km² a mais para o método indireto.

No geral, os indicadores foram menos agressivos com os valores de erodibilidade tabelados em comparação com os das amostras coletadas *in situ*, demonstrando que os resultados da modelagem com o K obtido empiricamente refletem em uma distribuição da erosão menos ampla e concentrada em um patamar mais intermediário. Os gráficos dispostos na Figura 38 comparam os resultados da modelagem com os dados de literatura e com a erodibilidade calculada com as amostras coletadas em campo.

Figura 38: Gráficos de porcentual de perda de solo por classe para valores de K da literatura (acima) e calculados pelo método indireto de Sharpley e Williams (1990) (abaixo).



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Ao observar a evolução do mapa de uso e cobertura da terra, é possível ver de maneira nítida como a expansão da Rebio de Duas Bocas entre 1970 e 2012 foi importante para controlar as perdas por erosão hídrica na região da bacia, uma vez

que, mesmo com sua presença, a maior parte de seu território apresenta índices Moderados para perdas, em virtude das elevadas declividade e grau de dissecação do relevo.

De igual maneira, quando observamos a evolução da ocupação humana na região da Bacia, o percentual de áreas ocupadas vem aumentando de maneira significativa, ainda que no mapa de 2019 essas áreas estejam representadas na classe Outros, por se tratar de áreas em construção e não plenamente urbanizadas. Conforme observado em campo, a escolha indiscriminada de locais para a remoção da cobertura vegetal e expansão agrícola tem intensificado o processo erosivo hídrico, refletindo até mesmo no surgimento de voçorocas e ravinas nas imediações dos bairros Prolar, Alice Coutinho, Antônio Ferreira Borges e Porto Belo II. A Figura 39 exibe um exemplo das consequências da erosão hídrica na área de estudos.

Figura 39: Área de solo descoberto afetada por erosão hídrica no bairro Prolar, Cariacica.



Fonte: do autor (2019).

Também convém mencionar que entre os anos de 2012 e 2019, embora haja um aumento dos menores índices erosivos, também foi registrado um incremento da classe Muito Elevado, causado principalmente pelo aumento de áreas de Solo Exposto e também do surgimento de novas obras também dispostas na classe Outros,

como a rodovia ES-120 (Contorno de Aroaba), que estava em fase de construção durante o período de registro das imagens de satélite, tornando a região mais suscetível à erosão.

É válido lembrar que esse modelo de predição erosiva não pode ter seus resultados tomados de maneira quantitativa, dada a natureza empírica de sua formulação e atribuição de valores para as variáveis que o compõem. Como consequência, os valores de A exprimem meramente uma ordenação de caráter qualitativo das áreas quanto ao seu potencial de perdas de solos por erosão hídrica (STEIN *et al.*, 1987). Os próprios autores do modelo estimam que sua extrapolação torna a avaliação quantitativa menos precisa para gradientes de declividade superiores a 18 graus e inferiores a 3 graus, bem como para comprimentos de encosta superiores a 122m (WISCHMEIER; SMITH, 1978). No entanto, o modelo ainda é uma boa ferramenta para identificação espacial das áreas que merecem mais atenção para se evitar o esgotamento dos solos.

Em comparação com outros trabalhos da região, o de Santos (2016) resultou na produção de mapas temáticos de vulnerabilidade erosiva nos anos de 1970 e 2012, com resultados mais conservadores acerca dos riscos de perdas por erosão hídrica, por atribuir pesos empíricos mais simples a critérios como a influência do solo e da das precipitações, bem como o relevo, que na EUPS são determinados por fórmulas, restringindo seu caráter empírico aos índices de uso e cobertura da terra e de práticas conservacionistas. No entanto, as zonas mais suscetíveis a sofrerem com os efeitos da erosão de ambos os trabalhos foram essencialmente iguais.

7) CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstrou, conforme esperado, que a utilização da EUPS enquanto ferramenta integrada para a avaliação da estimativa de erosão, tanto para o futuro quanto para validação das observações verificadas a respeito das mudanças no uso e cobertura da terra que ocorreram na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas desde a década de 1970 foi viável. Embora haja limitações na representação quantitativa da perda de solos devido a seu caráter empírico e pela ausência de dados de calibração para o modelo, o emprego da EUPS é válido para a verificação das perdas de solos oriundas da atual ocupação da terra e permite a simulação de cenários futuros, tanto de caráter mais conservacionista quanto em hipóteses em que haja mais avanços das atividades antrópicas, conforme demonstrado na análise mais recente.

A obtenção do mapa de Potencial Natural de Erosão (PNE) da região de estudo também pode ser considerado importante, uma vez que tal produto subsidia de maneira direta não apenas a presença da Rebio de Duas Bocas na região, com o propósito de se evitar as perdas de solo, mas também serve de referência para o pior cenário possível de erosão hídrica na área da bacia hidrográfica. Isto é, as localidades que estiverem mais condizentes com os índices identificados nesse mapa são as que devem ter atenção primária para se evitar o esgotamento do solo e outros tipos de riscos erosivos mais severos.

O mapa de erodibilidade dos solos produzido a partir da interpolação dos pontos de coleta e do método indireto de Sharpley e Williams (1990), que utiliza apenas a granulometria e o teor de matéria orgânica dos solos apresentou valores condizentes para a região em comparação com os valores encontrados na literatura, indicando que a aplicação dessa metodologia para as classes pedológicas de Duas Bocas foi adequada, apesar da classe de Neossolos Litólicos ter apresentado um índice ligeiramente inferior ao de trabalhos prévios.

Além disso, mesmo com uma disposição amostral bastante concentrada em poucas classes de solo, proporcionada pela configuração singular da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, que impediu a coleta de solos nas porções mais a norte, principalmente

da classe de Latossolos Amarelos, não houve prejuízo significativo para a interpolação do mapa de erodibilidade e nos indicadores reais de perda de solo na região. No entanto, para trabalhos futuros, deve-se avaliar a possibilidade da amostragem dessa classe que foi representada de maneira muito menos significativa do que o desejável.

Apesar dos índices de perda de solo terem diminuído entre 1970 e 2012 graças a política de criação da Reserva de Duas Bocas, outrora classificada como Reserva Florestal, atuando como uma barreira (*buffer*) de proteção na região, houve um regresso desse valor no ano de 2019, com crescimento observável das perdas de solo em maiores patamares. Isso ocorreu em virtude do aumento da fronteira urbana na região sul da bacia, das áreas com solo exposto, que são as mais vulneráveis ante os efeitos da erosão hídrica e da construção da rodovia ES-120, que atravessa o território da bacia hidrográfica e passa a ocupar áreas antes protegidas por cobertura vegetal, estimulando os processos erosivos em suas imediações.

As zonas mais suscetíveis ao processo de perda de solos na bacia hidrográfica do rio Duas Bocas encontram-se historicamente no compartimento entre a fronteira oriental da Reserva e as localidades mais a leste da bacia, com o uso da terra predominante de cultivo de bananeiras, sob domínio de Cambissolos Hápicos, pouco profundos, relativamente pouco intemperizados, com restrições de drenagem, porém, não severas, mas que os tornam suscetíveis à erosão hídrica. Além disso, tais zonas apresentam elevados valores de fator topográfico, indicando que tanto o comprimento das encostas como seus gradientes de declividade são significativos.

Por fim, os resultados da aplicação da modelagem via EUPS mostram a distribuição espacial das áreas mais suscetíveis à erosão hídrica na região de Duas Bocas, nas quais as práticas conservacionistas podem ser empregadas para minimizar as perdas de solo. Tal análise é de suma importância, uma vez que serve de subsídio para o planejamento ambiental da bacia hidrográfica, além de servir como ponto de partida para se traçar um cenário futuro pautado no desenvolvimento sustentável da região, no qual as atividades humanas sejam desenvolvidas de maneira menos danosas ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS — ANA. **PORTAL HIDROWEB**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 28 jan. 2020.
- AKKALA, Arjun; DEVABHAKTUNI, Vijay; KUMAR, Ashok. Interpolation Techniques and Associated Software for Environmental Data. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v. 29, n. 2, p. 134–141, 17 maio 2010.
- ALMEIDA, Brivaldo Gomes de *et al.* **Padronização de métodos para análise granulométrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2012. (Comunicados Técnicos).
- ANDRÉ, Clayton. **ABORDAGEM HISTORIOGRÁFICA SOBRE A RESERVA BIOLÓGICA DE DUAS BOCAS/CARIACICA-ES**. 2012. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de História, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012. Disponível em: https://ape.es.gov.br/Media/ape/PDF/Dissertações%20e%20Teses/História-UFES/UFES_PPGHIS_CLAYTON_ANDRÉ.pdf. Acesso em: 01 jan. 2022.
- BAGARELLO, Vincenzo *et al.* Estimating the USLE Soil Erodibility Factor in Sicily, South Italy. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 28, n. 2, p. 199–206, 2012.
- BACCHI, Osny. O.S; REICHARDT, Klaus; SPAROVEK, Gerd. Sediment Spatial Distribution Evaluated by Three Methods and Its Relation to Some Soil Properties. **Soil and Tillage Research**, v. 69, n. 1–2, p. 117–125, fev. 2003.
- BARBOSA, Luciano. **Álgebra de Mapas**. Disponível em: <<https://intranet.ifs.ifsuldeminas.edu.br/luciano.barbosa/EAC-SIG/aula04-AlgebraMapas-SIG.pdf>>. Acesso em: 1 abr. 2021.
- BARROSO, Gilberto Fonseca; Marchioro, Eberval. **Estudos de Parâmetros Morfométricos e Sólidos em Suspensão em Bacias Hidrográficas como Subsídios ao Manejo Ambiental: estudo de caso das sub-bacias do rio Duas Bocas (ES)**. In: VIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Uso Múltiplo do Recurso Natural, 1999. Vol. 01. Belo Horizonte, 1999. p. 40-41.
- BASTOS, César Augusto Burkert. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 303 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.
- BERTONI, D.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. Editora Ícone, São Paulo, 1990.
- BRASIL. **Plano de conservação da Bacia do Alto Paraguai (Pantanal): PCBAP**. Brasília: Embrapa Territorial, 1997. 12 v.
- BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Geologia, Folhas SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória ao Milionésimo. In: **Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia, 1983. v. 32, p. 27-304.
- BRHANE, Gebreyesus; MEKONEN, Kirubel. Estimating Soil Loss Using Universal Soil Loss Equation (USLE) for Soil Conservation planning at Medego Watershed, Northern Ethiopia. **Journal Of American Science**, Michigan, v. 5, n. 1, p. 58-69, 01 jan. 2009.

BONI, Rafael. Histórico da Reserva Biológica. In: MERÇON, L; PEREIRA, O; THOMAZ, L. **Últimos Refúgios: Reserva Biológica de Duas Bocas**. Série – Áreas Protegidas. Vol. 1. 1. ed., Associação Últimos Refúgios. Vitória - ES, 2012.

CÂMARA, Gilberto. **Modelos, linguagens e arquiteturas para bancos de dados geográficos**. 1995. 238 f. Tese (Doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1995.

CÂMARA, Gilberto; DAVIS, Clodoveu; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Introdução à ciência da Geoinformação**. 1. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. v. 1.

CARVALHO, Newton de Oliveira. **Hidrossedimentologia Prática**. 1. ed. Rio de Janeiro: CPRM, 1994.

CHECCHIA, Tatiane. **Avaliação de perda de solo por erosão hídrica e estudo de energia na bacia do Rio Caeté, Alfredo Wagner - Santa Catarina**. 2005. 166 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

CONRAD, O. **Module LS-Factor, Field Based**. 2013. Disponível em: <http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.1.4/ta_hydrology_25.html>. Acesso em: 1 jun. 2020.

COOPER, Kurt. **Evaluation of the Relationship Between the RUSLE R-Factor and the Mean Annual Precipitation**. Fort Collins: Colorado State University, 37p. 2011.

CORRÊA, Edvania Aparecida; MORAES, Isabel Cristina; PINTO, Sérgio dos Anjos Ferreira. Estimativa da erodibilidade e tolerância de perdas de solo na região do centro leste paulista. **Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 4, p. 848-860, jan. 2015.

CORREA, Wesley de Souza Campos. **Campo Térmico E Higrométrico da Regional Praia do Canto no Município de Vitória (ES)**. 165 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

CORRECHEL, Vladia. **Avaliação de Índices de Erodibilidade através da técnica da análise da redistribuição do “fallout” do ¹³⁷Cs**. 2003. 99 f. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **BREVE DESCRIÇÃO DAS UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS AFLORANTES NO ESTADO DE SÃO PAULO**. São Paulo: Cprm, 2006. 195 p. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/2966/1/breve_descricao_unidades.pdf. Acesso em: 14 ago. 2019.

CUPERTINO, Wallace. **Áreas de contribuição e aporte hidrossedimentológico no reservatório de Duas Bocas - Cariacica – ES**. 2018. 118f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

DESMET, P. J. J.; GOVERS, G. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor on Topographically Complex Landscape Units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n. 5, p. 427–433, 1 set. 1996.

DEVATHA, C.P.; DESHPANDE, Vaibhav; RENUKAPRASAD, M.S. Estimation of Soil Loss Using USLE Model for Kulhan Watershed, Chattisgarh- A Case Study. **Aquatic Procedia**, v. 4, p. 1429–1436, 2015.

DULEY, F.L.; HAYS, O.E. The effect of the degree of slope on run-off and soil erosion. **Journal of Agricultural Research**, v. 45, n. 6, p. 349–360, 15 set. 1932.

EMPRESA BRASILEIRA DE SERVIÇOS AGROPECUÁRIOS - EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro: Empresa Brasileira de Serviços Agropecuários - Embrapa, 2011. 213 p.

_____. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 4. ed. Brasília: Embrapa Solos, 2013. 356 p.

ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. **Lei Nº 4.503/1991**. Vitória, ES, 03 jan. 1991. Disponível em: <http://www3.al.es.gov.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/LEI45031991.html>. Acesso em: 01 jan. 2022.

_____. **O que é o Reflorestar?** 2012. Disponível em: https://seama.es.gov.br/o_que_e_reflorestar. Acesso em: 30 jan. 2022.

_____. **Plano de Manejo da Reserva Biológica de Duas Bocas**. Cariacica: Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - IEMA, 2020. 244 p. Disponível em: iema.es.gov.br/Media/iema/Unidades%de&Conserva%do/Plano%de%Manejo%Rebio%V%final%18_08-compactado.pdf. Acesso em: 01 jan. 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization. La erosión del suelo por el agua: Algunas medidas para combatirla en las tierras de cultivo. **Cuadernos de fomento agropecuario de la Organización de Las Naciones Unidas**, Roma: FAO; 1980; (81). 207 p.

FERNANDES, V. O. *et al.* **Potencial de florações de cianobactérias em um reservatório de abastecimento doméstico no estado do Espírito Santo (reservatório Duas Bocas-Cariacica-ES)**. Relatório apresentado à Funasa. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2005.

FERREIRA, Ialy Gomes. **Dinâmica da água subsuperficial em uma cabeceira de drenagem do rio Duas Bocas (Reserva Biológica de Duas Bocas - ES)**. 2019. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2019.

FIORESE, Caio Henrique Ungarato. Vulnerabilidade atual e natural à erosão do solo na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Floresta, no município de Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo, Brasil. **Labor & Engenho**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 1-13, 01 dez. 2020.

FREEMAN, T. Graham. Calculating Catchment Area with Divergent Flow Based on a Regular Grid. **Computers & Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413–422, jan. 1991.

GALDINO, Sérgio; GREGO, Célia Regina; SILVA, João dos Santos Vila da. Distribuição espacial da erosividade da chuva na Bacia do Alto Paraguai, Brasil. In: 5º SIMPÓSIO DE GEOTECNOLOGIAS NO PANTANAL, 22-26 nov. 2014, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 211–219.

GAMEIRO, Marcelo Gonçalves. **Avaliação de métodos para obtenção dos fatores “L” e “S” da EUPS numa microbacia, via geoprocessamento e banco de dados**. 1997. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

- GAO, Yang *et al.* A degradation threshold for irreversible loss of soil productivity: a long-term case study in China. **Journal Of Applied Ecology**, [S.L.], v. 48, n. 5, p. 1145-1154, 31 maio 2011. [Http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02011.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02011.x)
- GARCÍA-CHEVESICH, Pablo A.. Factores que afectan la erosión y la sedimentación. In: BREA, Daniel; BALOCCHI, Francisco (org.). **Documento Técnico Nº 22: Procesos de erosión — sedimentación en cauces y cuencas**. Montevideo: Unesco, 2010. Cap. 1. p. 9-21.
- GARCÍA-RUIZ, José M. *et al.* A Meta-Analysis of Soil Erosion Rates across the World. **Geomorphology**, v. 239, p. 160–173, jun. 2015.
- GASPARI, Fernanda J.; RODRÍGUEZ VAGARÍA, Alfonso M.; SENISTERRA, Gabriela E. Estimation of soil erosionability in the stream basin of Pillahuinco Grande, Province of Buenos Aires, Argentina. **Ciencia e investigación agraria**, v. 36, n. 1, p. 43–52, abr. 2009.
- GONZÁLEZ, Emilio. La importancia de la conservación del suelo frente a la erosión. **Vida Rural**, Madrid, n. 169, p. 22-24, 15 maio 2003.
- GUERRA, Antônio José Teixeira; BOTELHO, Rosângela Garrido Machado. **Erosão dos solos**. In: Geomorfologia do Brasil. Orgs.: Antônio José Teixeira Guerra e Sandra Baptista da Cunha. 2a ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001.
- HERNANI, L.C. *et al.* Perdas por erosão e rendimentos de soja e de trigo em diferentes sistemas de preparo de um latossolo roxo de Dourados (MS). **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 667–676, 1997.
- HONORATO, R. *et al.* Evaluación del Modelo Usle en la Estimación de la Erosión en Seis Localidades entre la IV y IX Región de Chile. **Ciencia e Investigación Agraria: revista latinoamericana de ciencias de la agricultura**, Santiago (Chile), v. 28, n. 1, p. 7-14, jan. 2001.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo 2010 - Cariacica**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/cariacica/pesquisa/23/25207?tipo=ranking>>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- INSTITUTO JONES DOS SANTOS NEVES – IJSN. **Mapeamento Geomorfológico do Estado do Espírito Santo**. 19 f. Nota técnica 28 Vitória, ES, 2012.
- KARABURUN, Ahmet. Estimation of C factor for soil erosion modeling using NDVI in Buyukcekmece watershed. **Ozean Journal of Applied Sciences**, v. 3, n. 1, p. 77–85, 2010.
- KRUSEKOPF, Henry Herman. **The Effect of Slope on Soil Erosion**. Research Bulletin, nº 363. [S.l.]: University of Missouri, abr. 1943.
- LACERDA, W. A., SANDRONI, S. S. Movimento de Massas Coluviais, **Anais da Mesa Redonda sobre Aspectos Geotécnicos de Encostas**, ABMS, Rio de Janeiro, 157 RJ, Brasil, v.3, p. 1-19. 1985.
- LAFLEN, J.M.; MOLDENHAUER, W.C. **Pioneering Soil Erosion Prediction: The USLE Story**. 1. ed. Tailândia: World Association of Soil and Water Conservation, 2003.
- LAL, Robert; SOIL AND WATER CONSERVATION SOCIETY (U.S.). **Soil Erosion Research Methods**. Milton, UNITED KINGDOM: Routledge, 2017.

LEITÃO, Heloisa Helena Franco. **Propriedades, erodibilidade e produtividade de camadas de podzólico vermelho-amarelo eutrófico e cambissolo eutrófico, submetidas à erosão simulada**. 1995. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1995.

LEMOS, Fernando Henrique. **Fluxos hidrossedimentológicos e de nutrientes no rio Duas Bocas - Cariacica – ES**. 2018. 89f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

LOBO, Ícaro Alves. **Escoamento de água pelo tronco no fragmento Florestal de Mata Atlântica da Reserva Biológica de Duas Bocas (ES)**. 2017. Relatório de Iniciação Científica (Graduando em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017. (Orientador: Prof. Dr. Eberval Marchioro).

LOMBARDI NETO F., MOLDENHAUER, W.C. Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas, SP. **Bragantia**, 51: 189-196. 1992.

LOPEZ, Juan F. B. **Interceptação de águas pluviais em um fragmento de mata atlântica da reserva biológica de Duas Bocas, Cariacica (ES) Brasil**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

MARCHIORO, Eberval. **Avaliação de sólidos Transportados, Parâmetros da Morfometria e Solos de Seções Fluviais do Córrego Naiaçú (Reserva Biológica de Duas Bocas - ES)**. 1996. 53 f. Monografia (graduação em Geografia) - Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 1996.

_____. **Modelagem hidrosedimentológica na bacia do córrego Santa Maria: Subsídios à Aplicação de Práticas de Conservação de Água e Solo no Noroeste Fluminense**. 2008. 221 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

_____. A Incidência de Frentes Frias no Município de Vitória (ES). **Revista ACTA Geográfica**, p. 49–60, 2012.

MARCHIORO, Eberval; KERCKHOFF, Juliana Neri; LORENA, Rodrigo. Borrego. Análise do campo térmico da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas (ES). **Revista de Geografia (Recife)**, v. 33, p. 239-257, 2016.

MARQUES, J.J.G.s.M *et al.* Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solos com horizonte B textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência dos Solos**, Viçosa, v. 21, n. 1, p. 457-465, 1997.

MARTINS, Sérgio Gualberto *et al.* Rainfall erosivity and rainfall return period in the experimental watershed of Aracruz, in the coastal plain of Espírito Santo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 3, p. 999–1004, jun. 2010.

MATOS, Thiago Vieira da Silva. **Determinação de áreas de vulnerabilidade à erosão hídrica com base na equação universal de perda de solo (USLE)**. 2015. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MERRIAM, Annie Thayer. **Geospatial Model of the Universal Soil Loss Equation for Fremont County, Colorado and the Universal Soil Loss Equation Applied to**

Fuels Reduction Treatments. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Applied Natural Science, College of Science and Mathematics, Colorado State University, Pueblo, 2005.

MORAIS, Reurysson Chagas de Sousa; SALES, Marta Celina Linhares. Estimativa do Potencial Natural de Erosão dos Solos da Bacia Hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí-Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica / Estimation of the Natural Soil Erosion Potential of the Upper Gurguéia Basin, Piauí-Brazil (...). **Caderno de Geografia**, [S.L.], v. 27, n. 1, p. 84, 23 nov. 2017. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. <http://dx.doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27nesp1p84>.

MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation.** 3rd ed ed. Malden, MA: Blackwell Pub, 2005.

NOGAMI, Job Shugi; VILLIBOR, Douglas Fadul. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos.** 1. ed. São Paulo: Editora Villibor, 1995. v. 1.

NOVELLI, F. Z. **A Reserva Biológica de Duas Bocas e seus Vínculos à História da Conservação no Espírito Santo.** Revista Natureza Online. Publicado pela ESFA [online] <http://www.naturezaonline.com.br>. ISSN 1806–7409, 2010.

OLIVEIRA, Juliana Aparecida. **Análise da perda de solo na Bacia Hidrográfica do Ribeirão do Feijão, São Carlos (SP).** 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia de Energia - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2011.

OLIVEIRA, Paulo Tarso Sanches; WENDLAND, Edson; NEARING, Mark A.. Rainfall erosivity in Brazil: a review. **Catena**, [S.L.], v. 100, p. 139-147, jan. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2012.08.006>.

OSMAN, Khan Towhid. **Soil Degradation, Conservation and Remediation.** 1st ed. 2014 ed. Dordrecht: Springer Netherlands: Imprint: Springer, 2014. p. 69–102.

PIMENTEL, David. Soil Erosion: A Food and Environmental Threat. **Environment, Development and Sustainability**, v. 8, n. 1, p. 119–137, fev. 2006.

PERRONE, Adriano. **Estudos Preliminares sobre a Carga de Sólidos Transportados, Parâmetros Morfométricos e Pluviométricos da Bacia do Córrego Pau Amarelo – Reserva Biológica de Duas Bocas – ES.** Monografia (Graduação) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1995.

POLONI, Diogo Medici. **Desenvolvimento e Aplicação de Procedimentos Metodológicos em Suporte ao Planejamento Participativo para Redução de Perda de Solos em Pequenas Bacias Hidrográficas com Emprego da EUPS.** 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

PORTZ, Luana; GUASSELLI, Laurindo Antonio; CORRÊA, Iran Carlos Stalliviere. Variação Espacial e Temporal de NDVI na Lagoa do Peixe, RS (Spatial and Temporal Variation of NDVI in the Peixe Lagoon, RS). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 5, p. 897, 27 fev. 2012.

PROCHNOW, Daniel *et al.* Razão de perdas de terra e fator C da cultura do cafeeiro em cinco espaçamentos, em Pindorama (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 1, p. 91–98, fev. 2005.

QUEIROGA, Gláucia Nascimento; SOARES, Antônio Carlos Pedrosa; JÚNIOR, Jorge Geraldo Roncato; DIAS, Paulo Henrique Amorim, GUIMARÃES, Henrique Alvim; COUTINHO, Mariana Oliveira Gondin; FREITAS, Natália Cota de; GRADIM, Camila Tavares; BRAGA, Flávia Cristina Silveira; NOVO, Tiago Amâncio. **Geologia e recursos minerais da folha Nova Venécia SE.24-Y-B-IV, estado do Espírito Santo, 153 escala 1:100.000**. Gláucia Nascimento Queiroga... [et al.]; organizador Luiz Carlos da Silva. – Belo Horizonte: CPRM, 2012.

RANIERI, Simone Beatriz Lima. **Estimativa da erosão do solo em uma bacia hidrográfica no município de Piracicaba (SP) utilizando os modelos USLE e WEPP**. 2000. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

RANIERI, Simone Beatriz Lima *et al.* Erosion Database Interface (EDI): A Computer Program for Georeferenced Application of Erosion Prediction Models. **Computers & Geosciences**, v. 28, n. 5, p. 661–668, jun. 2002.

RENARD, K. G. *et al.* (1997). **Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)**. Washington: USDA 1997. 404 p. (Agriculture handbook, n. 703).

RESENDE, Mauro. **Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos**. In: Informe Agropecuário, Nº. 128, 1985.

RIBEIRO, Anna Paula Lage. **Aperfeiçoamento do emprego da equação universal de perda de solo na aplicação do pagamento por serviços ambientais da política espírito-santense de recursos hídricos**. 2012. 166 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

RIBEIRO, Luziane Santos. **Análise qualitativa e quantitativa de erosão hídrica no município de Campos dos Goytacazes/RJ Através de técnicas de geoprocessamento**. 2006. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2006.

RUIZ, Hugo Alberto. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (Silte + Argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [S.L.], v. 29, n. 2, p. 297-300, abr. 2005. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-06832005000200015>.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos *et al.* **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5. ed. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA, 2018. v. 1.

SANTOS, James Rafael Ulisses dos. **Análise Integrada da Vulnerabilidade Erosiva da Bacia Hidrográfica do Rio Duas Bocas (ES)**. 2016. 178 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2016.

SANTOS, James Rafael Ulisses dos; MARCHIORO, Eberval. Análise empírica da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do rio Duas Bocas, Espírito Santo, Brasil. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 39, p. 72–87, 26 jun. 2020.

SHARPLEY, Andrew N.; WILLIAMS, J. R.. **EPIC, Erosion/Productivity Impact Calculator**. Beltsville: United States, And Agricultural Research Service., 1990. 235 p.

SIMANTON, J.R.; RENARD, K.G.. Seasonal Change in Infiltration and Erosion from USLE Plots in Southeastern Arizona. **Hydrology and Water Resources in Arizona And the Southwest**, Flagstaff, p. 37-46, 24 abr. 1982.

SILVA, Antonio Marcos da *et al.* EROSIVIDADE DA CHUVA E ERODIBILIDADE DE CAMBISSOLO E LATOSSOLO NA REGIÃO DE LAVRAS, SUL DE MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 6, n. 33, p. 1811-1820, jan. 2009.

SILVA, Alexandre Marco da. Rainfall Erosivity Map for Brazil. **CATENA**, v. 57, n. 3, p. 251–259, ago. 2004.

SILVA, Fernando das Graças Braga da *et al.* Previsão da perda de solo na Fazenda Canchim - SP (EMBRAPA) utilizando geoprocessamento e o USLE 2D. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 141–148, jun. 2010.

SILVA, Valtercides Cavalcante da. Cálculo automático do Fator Topográfico (LS) da EUPS, na Bacia do Rio Paracatu. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, [S. l.], v. 33, n. 1, p. 29–34, 2007.

SOUZA, Alanderson Gomes de Souza; SILVA, Filipe Bertholini; MARCHIORO, Eberval. Dinâmica hidrossedimentológica da Bacia hidrográfica do córrego Pau Amarelo, na Reserva Biológica de Duas Bocas – Cariacica (ES). In: XIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 24-28/09/2018, Vitória. **Anais...** Vitória: Associação Brasileira de Hidrologia, 28/09/2018. p. 1–8.

STEIN, D. P. ; DONZELLI, P. L. ; GIMENEZ, A.F.; PONÇANO, W. L.; LOMBARDI NETO, F. Potencial de erosão laminar, natural e antrópica, na bacia do PeixeParanapanema. In: SIMPOSIO NACIONAL DE CONTROLE DA EROSIÃO, 4., Marília, 1987. **Anais...** São Paulo, Dept Tec. Águas e Energia Elétrica, 1987. p 105-135

TOMAZONI, Julio Caetano.; GUIMARÃES, Elisete. A sistematização dos fatores da EUPS em SIG para quantificação da erosão hídrica na Bacia do Rio Jirau. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 57, n. 3, 11.

VIEIRA, Sidney Rosa; LOMBARDI NETO, Francisco. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 54, n. 2, p. 405–412, 1995.

Water Erosion of Agricultural Land | Manure Phosphorus and Surface Water Protection III: Transport Factors - passel. Disponível em: <<https://passel2.unl.edu/view/lesson/4155530d3188/2>>. Acesso em: 01 abr. 2021.

WEILL, Mara de Andrade Marinho. **Estimativa da erosão do solo e avaliação do seu impacto na Microbacia do Ceveiro (Piracicaba, SP), através do índice de tempo de vida.** 1999. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

WISCHMEIER, Walter H.; SMITH, Dwight David. **Predicting Rainfall Erosion Losses.** [S.l.]: Department of Agriculture, Science and Education Administration, 1978.

ZACHAR, Dušan. Erosion Factors and Conditions Governing Soil Erosion and Erosion Processes. **Soil Erosion.** Developments in Soil Science. Amsterdam; New York: Elsevier Scientific Pub. Co.: distribution for the U.S.A. and Canada, Elsevier North-Holland, Inc, 1982. p. 205–346.

ZEVENBERGEN, Lyle W.; THORNE, Colin R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, n. 1, p. 47–56, jan. 1987.

ŽIVOTIĆ, Ljubomir *et al.* Application of USLE, GIS, and Remote Sensing in the Assessment of Soil Erosion Rates in Southeastern Serbia. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 21, n. 6, p. 1929–1935, 2012.