



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Caroline Costa Borges

**ESTIMATIVA FUTURA DA PERDA DE SOLO NO ENTORNO DOS  
CURSOS DE ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
CARAPIRANGA (SP)**

Sorocaba

2024

**Caroline Costa Borges**

**ESTIMATIVA FUTURA DA PERDA DE SOLO NO ENTORNO DOS  
CURSOS DE ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
CARAPIRANGA (SP)**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Instituto de Ciência e  
Tecnologia de Sorocaba, Universidade  
Estadual Paulista (UNESP), como parte  
dos requisitos para obtenção do grau de  
Bacharela em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Ma. Hetiany Ferreira da Costa

Coorientador: Prof. Dr. Darllan Collins da  
Cunha e Silva

Sorocaba

2024

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B732e | <p>Borges, Caroline Costa</p> <p>Estimativa futura da perda de solo no entorno dos cursos de águas da Bacia Hidrográfica do rio Carapiranga (SP) / Caroline Costa Borges. -- Sorocaba, 2024</p> <p>64 p.</p> <p>Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba</p> <p>Orientadora: Hetiany Ferreira da Costa</p> <p>Coorientador: Darllan Collins da Cunha e Silva</p> <p>1. Geoprocessamento. 2. Equação Universal de Perda de Solo. 3. Markov, Processos de. 4. Solos - Erosão. 5. Conservação da natureza. I. Título.</p> |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**Caroline Costa Borges**

**ESTIMATIVA FUTURA DA PERDA DE SOLO NO ENTORNO DOS  
CURSOS DE ÁGUAS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO  
CARAPIRANGA (SP)**

Trabalho de Conclusão de Curso de  
Graduação apresentado como parte dos  
pré-requisitos para a obtenção do título de  
Engenheira Ambiental, à Universidade  
Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Sorocaba, 26 de julho de 2024

**Ma.(a) Hetiany Ferreira da Costa**  
Orientador

**Ma.(a) Bruna Henrique Sacramento**  
Banca Examinadora

**Dr.(a) Leticia Tondato Arantes**  
Banca Examinadora

Sorocaba  
2024

## RESUMO

A erosão pluvial, apesar de ser considerada como um processo natural, é potencializada pela supressão de áreas naturais para agricultura e urbanização. A exposição do solo aos fatores intempéricos resulta na desagregação e carreamento de partículas, podendo causar assoreamento dos cursos d'água. O presente trabalho aborda a perda de solo na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga, no município de Registro (SP), com o objetivo de estudar as áreas suscetíveis à erosão nos anos de 2020 e 2050, através da metodologia de Wischmeier e Smith (1978) para estimar as perdas de solo na área de estudo, usando a *Universal Soil Loss Equation (USLE)*, além de priorizar a recomposição em áreas com risco de erosão, oferecendo soluções práticas e estratégias de manejo sustentável para garantir a integridade ambiental a longo prazo da bacia hidrográfica. A análise detalhada incorporou fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, fator topográfico e práticas conservacionistas. Para prever as perdas de solo em 2050, adotou-se a metodologia das Cadeias de Markov, analisando pares de imagens de cobertura do solo e gerando cenários futuros. O estudo também avaliou a conformidade das Áreas de Preservação Permanente (APPs) com o Código Florestal de 2012. Identificaram-se APPs sem cobertura vegetal em áreas propensas ao carreamento de sedimentos, priorizando a recomposição com base na susceptibilidade à perda de solo. Essas análises fornecem uma visão abrangente da dinâmica da perda de solo, orientando estratégias de gestão sustentável e conservação ambiental. A análise metódica das classes de uso da terra, combinada com os fatores da USLE, não só revelou os pontos críticos de perda de solo, mas também esclareceu as razões subjacentes a esses fenômenos. A delimitação de conflitos de uso da terra nas Áreas de Preservação Permanente (APPs) ofereceu uma base estratégica para priorizar a restauração da vegetação nativa, estratégia essencial para mitigar os processos erosivos e fortalecer a integridade ambiental da bacia. Além de abordar as questões atuais, este estudo lança um olhar ao futuro, prevendo o cenário para o ano de 2050, no qual foi possível observar uma melhoria de 90,29% para 93,07% na perda de solo nula a ligeira. As Cadeias de Markov foram empregadas como metodologia preditiva, oferecendo uma visão antecipada das possíveis mudanças na ocupação e cobertura do solo. Esta abordagem proativa permite antecipar desafios ambientais, proporcionando uma base sólida para estratégias futuras. Propõe-se a implementação de iniciativas inovadoras para preservação e recuperação, como o uso do Pagamento por Serviço Ambiental (PSA) que surge como uma estratégia econômica para incentivar a conservação, enquanto programas de educação ambiental são propostos para fortalecer a conscientização comunitária. Adicionalmente, sugere-se a criação de um abrangente Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, visando não apenas deter a degradação existente, mas também promover a restauração de áreas de preservação permanente impactadas pelo desmatamento. Este estudo não apenas contribui para a compreensão da dinâmica atual da bacia, mas também estabelece um roteiro estratégico para a sustentabilidade a longo prazo, abordando desafios presentes e futuros de maneira abrangente.

**Palavras-chave:** Erosão; USLE; Cadeias de Markov; Conservação Ambiental; Geoprocessamento.

## ABSTRACT

Rainfall erosion, despite being considered a natural process, is exacerbated by the suppression of natural areas for agriculture and urbanization. Soil exposure to weathering factors results in particle disaggregation and transport, potentially causing watercourse siltation. This study addresses soil loss in the Carapiranga River watershed, located in the municipality of Registro (SP), aiming to assess erosion-prone areas in 2020 and 2050. The Wischmeier and Smith (1978) methodology and the Universal Soil Loss Equation (USLE) were employed to estimate soil losses, prioritizing reclamation in erosion-risk areas. The detailed analysis considered factors such as rainfall erosivity, soil erodibility, and conservation practices. To forecast 2050 soil losses, the Markov Chain methodology analyzed pairs of land cover images, providing future scenarios. The study also evaluated compliance of Permanent Preservation Areas (APPs) with the 2012 Forest Code. APPs lacking vegetation cover in sediment-prone areas were identified, prioritizing reclamation based on susceptibility to soil loss. These analyses offer a comprehensive view of soil loss dynamics, guiding sustainable management and environmental conservation strategies. The meticulous analysis of land use classes, combined with USLE factors, not only revealed critical soil loss points but also shed light on underlying reasons. Conflicts in land use within APPs provided a strategic foundation to prioritize native vegetation restoration—an essential strategy to mitigate erosive processes and strengthen environmental integrity in the watershed. In addition to addressing current issues, this study looks to the future, projecting a 90.29% to 93.07% improvement in soil loss from negligible to slight by 2050. Markov Chains served as a predictive methodology, offering an early insight into potential changes in land use and cover. This proactive approach allows anticipating environmental challenges, providing a solid foundation for future strategies. Innovative initiatives for preservation and recovery, such as Payment for Environmental Services (PES), emerge as an economic strategy to encourage conservation. Environmental education programs are proposed to enhance community awareness. Additionally, a comprehensive Plan for the Recovery of Degraded Areas is suggested, aiming not only to halt existing degradation but also to promote the restoration of APPs impacted by deforestation. This study not only contributes to understanding the current dynamics of the Carapiranga River basin but also establishes a strategic roadmap for long-term sustainability, addressing present and future challenges comprehensively.

**Keywords:** Erosion; USLE; Markov Chains; Environmental Conservation; Geoprocessing.

## SUMÁRIO

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                     | 8  |
| 2. OBJETIVOS .....                                                     | 10 |
| 2.1. OBJETIVO GERAL.....                                               | 10 |
| 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....                                        | 10 |
| 3. REVISÃO DA LITERATURA.....                                          | 11 |
| 3.1. BACIAS HIDROGRÁFICAS COMO UNIDADES DE ESTUDO E PLANEJAMENTO<br>11 |    |
| 3.2. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE .....                             | 12 |
| 3.3. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE PERDA DE SOLO (USLE).....         | 13 |
| 3.4. GEOPROCESSAMENTO .....                                            | 15 |
| 3.4.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS .....                       | 15 |
| 3.5. MODELOS DE PREVISÃO FUTURA .....                                  | 16 |
| 4. MATERIAL E MÉTODOS .....                                            | 18 |
| 4.1. ÁREA DE ESTUDO .....                                              | 18 |
| 4.2. MATERIAIS .....                                                   | 19 |
| 4.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....                                 | 19 |
| 4.3.1. USO E COBERTURA DA TERRA.....                                   | 19 |
| 4.3.2. USLE .....                                                      | 20 |
| 4.3.3. ELABORAÇÃO DOS FATORES DA USLE .....                            | 21 |
| 4.3.4. MODELO DE ESTIMATIVA FUTURA .....                               | 22 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....                                        | 24 |
| 5.1. USO E COBERTURA DA TERRA .....                                    | 24 |
| 5.2. PERDA DE SOLO .....                                               | 27 |
| 5.3. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE .....                             | 34 |
| 5.4. HIERARQUIZAÇÃO .....                                              | 35 |
| 5.5. ESTIMATIVA DE USO E COBERTURA DA TERRA 2050.....                  | 39 |
| 5.6. COMPARAÇÃO MULTITEMPORAL DO USO E COBERTURA DA TERRA.....         | 41 |
| 5.7. ESTIMATIVA FUTURA DO FATOR CP .....                               | 46 |
| 5.8. ESTIMATIVA FUTURA DE PERDA DE SOLO .....                          | 48 |
| 5.9. CENÁRIO DE RECUPERAÇÃO PARA O FUTURO .....                        | 51 |
| 6. CONCLUSÕES.....                                                     | 59 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                        | 60 |

## 1. INTRODUÇÃO

A erosão pluvial é um processo natural que ao longo do tempo geológico vem modelando a superfície terrestre. No entanto, a supressão de extensas áreas naturais por culturas agrícolas e áreas urbanizadas amplificam a exposição do solo aos fatores intempéricos, permitindo que uma grande quantidade de partículas do solo seja desagregada e carregada pelo impacto da chuva para os cursos d'água podendo resultar no seu assoreamento (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2012). Tais partículas, quando desagregadas e transportadas pelo escoamento superficial aumentam a probabilidade da ocorrência de cheias e poluição hídrica devido aos elementos químicos carregados, por exemplo, os agroquímicos (SILVA *et al.*, 2017).

Diante disso, houve a necessidade de compreender os processos erosivos e suas consequências para gerir de forma sustentável o território, como também as atividades antrópicas, o que possibilitou a geração de diferentes modelos matemáticos. Wischmeier e Smith (1978) foram os responsáveis pela criação da Equação Universal de Perda de Solo (*Universal Soil Loss Equation* - USLE), modelo que estima a perda de solo por erosão hídrica.

A USLE é uma metodologia amplamente utilizada para analisar cenários previstos para a perda de solo causada pela erosão hídrica. Esse modelo considera diversos fatores, como a intensidade da chuva, a capacidade do solo de ser erodido, as características do relevo e as práticas de manejo implementadas na área. Ao fornecer uma estimativa da perda de solo, a USLE permite que profissionais e gestores desenvolvam estratégias de conservação mais eficazes. Estudos recentes demonstram a relevância da USLE na análise da erosão em cenários brasileiros, evidenciando sua aplicação na promoção de práticas agrícolas sustentáveis (COSTA *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2021).

Aliado aos modelos matemáticos para estimar a erosão hídrica, os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) surgem como uma importante ferramenta para auxiliar na quantificação e qualificação da perda de solo por erosão hídrica, permitindo uma análise transversal dos dados e modelagem matemática dos fatores presentes na USLE (ALVES, 2021; MINGOTI, 2009; OLIVEIRA; LIMA, 2002). Portanto, a integração do SIG com a USLE possibilita análises mais complexas do ambiente, visando identificar áreas com alto potencial de carregamento de sedimentos para os



cursos de água e a situação das margens dos cursos de água que se encontram nestas áreas e que podem estar sendo afetados devido à supressão da cobertura vegetal no seu entorno.

A área de estudo escolhida neste trabalho é pertencente ao Vale do Ribeira, local que apresenta a maior concentração de mata atlântica dentro do Estado de São Paulo. Segundo Coliado et al. (2022), a partir de políticas conservacionistas elaboradas na década de 80, Unidades de Conservação (UC) foram criadas para que as áreas fossem legalmente protegidas, almejando maior proteção, assim como conservação e recuperação dos ecossistemas presentes na região. Além da importância da preservação da fauna e flora, os autores reforçam a presença de comunidades ribeirinhas, como caiçaras e indígenas, fazendo com que as práticas conservacionistas sejam essenciais neste local, já que a população depende dos recursos naturais para suas atividades diárias de subsistência.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Analisar as áreas suscetíveis à erosão na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga, localizada no município de Registro (SP), para os anos de 2010 e 2020, além de estimar as áreas com susceptibilidade à erosão em 2050, por meio da ferramenta Cadeias de Markov, devido a necessidade de conciliar o desenvolvimento socioeconômico com a preservação ambiental, garantindo que os recursos do Vale do Ribeira estejam disponíveis para as próximas gerações.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Elaborar informações cartográficas sobre o uso da terra e a perda de solo, confeccionar mapas que identifiquem as mudanças no uso da terra e a magnitude da perda de solo nas áreas estudadas, fornecendo uma base visual para a análise da erosão.

Gerar um mapa de perda de solo em áreas de conflito para 2020 e 2050, identificar e mapear as áreas onde a perda de solo é mais crítica, tanto no presente quanto nos cenários futuros, destacando as regiões que podem sofrer impactos significativos devido a atividades humanas.

Hierarquizar áreas de recuperação ambiental, ao avaliar e classificar as áreas que necessitam de recuperação ambiental, priorizando aquelas mais suscetíveis à erosão e que apresentam maior potencial para a restauração, a fim de direcionar esforços de conservação e manejo sustentável.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1. BACIAS HIDROGRÁFICAS COMO UNIDADES DE ESTUDO E PLANEJAMENTO

No Brasil, é notória a crescente demanda dos recursos hídricos devido ao aumento populacional e a sua distribuição desigual pelo território, fazendo com que cresçam os conflitos pelo uso da água (ROSSI; SANTOS, 2018). Com a expansão das malhas urbanas, torna-se cada vez mais desafiador monitorar as alterações que a paisagem e o meio ambiente sofrem, o que dificulta o controle da contaminação da água e do solo, da mesma forma com o aumento da impermeabilização do solo e das inundações. Nesse sentido, destaca-se a importância da criação de unidades de planejamento e gestão, viabilizadas por meio das bacias hidrográficas (SILVA *et al.*, 2021).

Uma definição das bacias hidrográficas é que elas são unidades utilizadas para análises relacionadas ao desenvolvimento de atividades e medidas, estruturais ou não, dentro de uma visão integrada da gestão dos recursos hídricos e ambientais no planejamento do território (CARVALHO, 2020). A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) foi responsável por instituir essa definição de recortes territoriais dentro do Brasil, ao promulgar a Lei nº 9.433 em 1997, em seguida, esta norma foi empregada sob a Lei de nº 11.445 no ano de 2007 (CARVALHO, 2020).

Para consolidar essas unidades gerenciais, a PNRH utiliza instrumentos como a outorga, que garante o direito de uso dos corpos d'água, e o enquadramento e a cobrança associados à utilização da água, a fim de prevenir possíveis conflitos decorrentes do uso dos recursos hídricos (ALVES SOBRINHO *et al.*, 2010). Conforme Alves Sobrinho *et al.* (2010), é essencial delimitar adequadamente uma bacia hidrográfica para o planejamento e a gestão efetiva dos fluxos de água em um território.

A presença de atividades humanas dentro das bacias hidrográficas, como cultivos e fábricas, pode causar impactos significativos no exutório, afetando negativamente a qualidade da água. Um artigo realizado por Damame *et al.* (2019) relata os impactos sofridos nas sub-bacias da região de Campinas (SP) por motivos do uso e cobertura da terra, verificando a correlação entre a expansão de malhas urbanas e diminuição de áreas verdes e permeáveis. Por meio de coletas e análises feitas nos locais, os autores conseguiram identificar que as ações humanas foram

responsáveis por causar alterações ambientais e perturbações na paisagem, resultando na fragilização dos ecossistemas da região, o que ressalta a importância de uma boa administração dos recursos (SILVA *et al.*, 2021).

### **3.2. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE**

As Áreas de Preservação Permanentes (APP) são regiões com proteção legal, estabelecidas visando a proteção do meio ambiente, não sendo próprias para alterações antrópicas e nem uso do solo. Dessa forma, deve-se manter a vegetação natural do local, visando a mitigação de problemáticas causadas pela falta de cobertura vegetal (ANDRADE *et al.*, 2020).

As zonas de APP são responsáveis pela proteção das matas ciliares, que estão ao redor de margens dos cursos d'água e outros corpos d'água, contribuindo para que os corpos hídricos não sejam assoreados, fato que acarreta a diminuição da vazão dos rios, além de impactar negativamente a fauna aquática e transformar negativamente os leitos. Ademais, sem cobertura vegetal, existe o aumento do escoamento superficial devido à falta de retenção do solo, o que também ocasiona a diminuição do abastecimento dos lenções freáticos e impacta o meio ambiente (ROSA, 2012).

As APP foram propostas com o intuito de preservar o meio ambiente e limitar as alterações antrópicas que causam impactos no solo, ocasionando a proibição de atividades de homens nestes locais. De acordo com a legislação, elas precisam obrigatoriamente conter a presença de vegetação preferencialmente nativa e possui como ação ambiental o objetivo de conservação dos recursos hídricos (MACHADO *et al.*, 2017).

A primeira descrição de APP surgiu no Código Florestal Brasileiro, no ano de 1965. Contudo, por apenas informar quais áreas poderiam ser consideradas ou não como de preservação permanente, com pouca descrição e detalhamento, muitas discussões foram travadas de forma judicial e doutrinária na época para averiguar o que realmente estava sob proteção da legislação (CASTRO *et al.*, 2018).

Esta problemática foi parcialmente solucionada quando a Medida Provisória de 2001 foi criada, a MP 2.166-67/01. Segundo Machado *et al.* (2017), além da MP, o Código Florestal sofreu alterações pelas leis de número 7.803/1989, 11.284/2006 da Resolução Conama. A partir disto, as definições de APPs foram restabelecidas no

novo Código Florestal nº 12.651/12, como sendo zonas que apresentam ou não cobertura vegetal nativa e que tem como objetivo a preservação dos recursos naturais e hídricos, além de promover maior estabilidade geológica, assim como para a fauna e flora, contribuindo para o fluxo gênico da biota e protegendo o solo para assegurar o bem-estar dos seres humanos (CASTRO *et al.*, 2018).

Ao avaliar o trecho de curso d'água presente na bacia hidrográfica do Arroio Grande, Campagnolo *et al.* (2017) fizeram comparações de delimitação entre os dois Códigos através dos mapas elaborados. Dessa forma, foi possível avaliar que o NCF permitiu avanços novos, contando com maior facilidade em delimitar as APP e que é um meio que pode contribuir para que os proprietários de terras consigam se adequar com relação à degradação de áreas que possuem menos faixas de preservação, além de propiciar melhor definição do leito regular a partir do uso de imagens de satélite.

### **3.3. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE PERDA DE SOLO (USLE)**

A Equação Universal da Perda de Solo (USLE) serve como uma ferramenta para tentar solucionar um dos grandes problemas ambientais enfrentados atualmente, que é a perda de solo devido à erosão hídrica. Sendo aplicada por mais de 30 anos por pesquisadores, a equação se tornou fundamental para o planejamento do território ao estimar as perdas anuais de solo por processos erosivos, podendo assim contribuir com práticas conservacionistas de recuperação destas áreas afetadas (NUNES *et al.*, 2017).

O Brasil é o 12º país no mundo responsável pela publicação de estudos referentes à erosão e preservação de solos, com pesquisas datadas com cerca de 70 anos atrás (BARRETO *et al.*, 2009). Inicialmente, a equação foi desenvolvida em 1978 por Wischmeier e Smith, mas passou por aperfeiçoamentos por outros pesquisadores. Com essa ferramenta, é possível fazer estimativas sobre a erosão laminar, resultante de sulcos, mas ela não considera a deposição dos sedimentos nem a data exata do depósito, seja para um ano específico ou um período indeterminado (SCARPINELLA *et al.*, 2019).

Os processos de erosão são influenciados por diversos fatores, dentre os quais se destacam a declividade e o comprimento de rampa de acordo com a topografia local, além de índices de precipitação, erodibilidade do solo e presença ou ausência de vegetação. Além disso, a hidrografia também exerce um papel fundamental, já que

alterações como a construção de barragens podem afetar a vazão dos corpos hídricos. Para estimar a perda de solo em áreas muito extensas, nos quais a medição em campo não é viável, utiliza-se a Equação Universal, que leva em consideração esses parâmetros (MOURA *et al.*, 2017).

Apesar da USLE ser utilizada com o intuito de encontrar o valor da perda de solo, o trabalho elaborado por Magalhães Filho *et al.* (2014) aplica a equação com o intuito de mapear as regiões com maior risco de erosão na área analisada. Dessa forma, o uso desta metodologia se mostrou adequada para não apenas encontrar o quanto de solo era perdido na área, como também demonstrar as regiões que apresentavam alta susceptibilidade erosiva. Estes resultados auxiliam na confecção de planos de manejo para Unidades de Conservação, assim como Áreas de Preservação Permanente e Áreas de Proteção Ambiental, servindo como uma útil ferramenta na gestão.

Um estudo feito por Souza *et al.* (2019) comparou os resultados obtidos com a USLE e os utilizando o método de Análise Empírica da Fragilidade dos Ambientes Naturais e Antropizados (AEFANA), a fim de determinar a susceptibilidade ambiental em uma bacia hidrográfica localizada em São Carlos (SP), definindo assim seus riscos erosivos. Segundo os autores, apesar de algumas divergências entre os dois modelos, a USLE demonstrou ser adequada para encontrar a fragilidade do solo, trazendo um maior nível de detalhamento às classes de pedologia e geologia. Possibilitou-se então que os dados encontrados fossem considerados durante a confecção de planos de manejo e adoção de práticas conservacionistas na bacia, visando as áreas com maior prioridade que estão sofrendo com a erosão hídrica (SOUZA *et al.*, 2019).

Cada bacia hidrográfica apresenta variações nas magnitudes de erosão superficial e produção de sedimentos, porque essas são características que estão diretamente relacionadas às flutuações na precipitação e nas tipologias específicas de cada região de captação (Kumar *et al.*, 2014). O uso de técnicas de Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento, com o auxílio dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) contribuem para lidar de forma mais eficiente com grande quantidade e diversidade de dados que descrevem as propriedades da superfície da área ou região em estudo. Em conjunto, essas ferramentas têm proporcionado novas formas de averiguar os fatores físicos que impactam os processos erosivos do solo e a produção de sedimentos em bacias hidrográficas (MOURA *et al.*, 2017).

### 3.4. GEOPROCESSAMENTO

O planejamento e análise do meio ambiente são tarefas complexas devido aos processos e interações existentes. A modelagem de ambientes e fenômenos é importante para permitir uma melhor compreensão e simulação do meio natural, requerendo formulações matemáticas simplificadas e abstratas. O geoprocessamento nasceu para facilitar a modelagem da fração física terrestre e gerar resultados precisos. Ele se baseia na ciência responsável pela utilização de técnicas de matemática e computação para elaborar estudos e análises de informações com origens geográficas ligadas à superfície da Terra (TAGLIARINI, 2017).

O Geoprocessamento pode ser definido como um conjunto de tecnologias que possibilitam o uso de técnicas para a obtenção de dados espaciais, que englobam os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), Sensoriamento Remoto, Cartografia Digital ou Automatizada, entre outras, que são submetidas à tratamentos e processamentos, para que o produto final contenha novos dados capazes de fornecer informações espaciais e georreferenciadas da superfície terrestre (ZAIDAN, 2017).

Com o passar dos anos, o geoprocessamento tem se tornado uma ferramenta essencial nos estudos voltados para análises tendo como objetivo a compreensão, modelagem e simulação da superfície terrestre. Nestes casos, ele se torna o agente principal de tratamento de dados, visando abranger toda a extensão de área dos projetos ambientais. Ademais, é possível observar que o geoprocessamento e produtos obtidos por meio do sensoriamento remoto auxiliam na obtenção e processamento de informações contidas em bacias hidrográficas (SIQUEIRA, 2019; TAGLIARINI, 2017).

#### 3.4.1. SISTEMAS DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são uma ferramenta amplamente reconhecida no campo do Geoprocessamento. Eles consistem em um conjunto de ferramentas, tanto de *hardware* quanto de *software*, que possibilitam a integração de dados, pessoas e dispositivos com o objetivo de coletar, armazenar e manipular informações espaciais referenciadas a sistemas de coordenadas conhecidos. Em outras palavras, os SIGs permitem a coleta e o processamento de dados georreferenciados em tempo real, o que é fundamental para a análise e o planejamento de projetos em diversas áreas (TAGLIARINI, 2017).

Segundo Nachtigall (2018), o uso de SIGs permite a representação do mundo real por meio de planos de informações que conseguem retratar aspectos reais do mundo e facilitam a correlação entre os dados. A construção de um banco de dados para o SIG envolve a obtenção de informações através de diferentes fontes, como mapas cartográficos, dados da região, como a tipologia do solo, fotos aéreas e imagens de satélite, que são analisadas, manipuladas e armazenadas de maneira adequada (SILVA, 2017).

O SIG é uma ferramenta com inúmeras aplicações e ampla presença em diversos setores da sociedade, sendo utilizado para o monitoramento de bacias hidrográficas, planejamento e mapeamento de zonas urbanas e rurais, apoio à administração pública estadual e municipal, mapeamento de solos, atualização de áreas florestais, entre outras finalidades (SILVA, 2017). Em uma de suas diversas aplicações, Gomes *et al.* (2018) utilizou as técnicas de SIG para calcular o fator topográfico da USLE, por meio do MDE (Modelo Digital de Elevação), encontrando os valores de 0,21 até 9,88 para os fatores, provando a eficiência dos sistemas geográficos para cálculos topográficos, como declividades e comprimentos de rampas.

### **3.5. MODELOS DE PREVISÃO FUTURA**

Juntamente com o SIG e o Sensoriamento Remoto, os modelos de previsão futura - que são baseados em algoritmos computacionais capazes de detectar mudanças, podem ser empregados para monitorar as transformações ocorridas no meio ambiente, da mesma forma podem ser utilizados para fazer previsões com base na dinâmica de uso e cobertura da terra em uma determinada região. Os modelos levam em consideração diversos processos, incluindo aqueles ambientais, sociais e econômicos, nos quais variáveis são analisadas com distintas abordagens metodológicas, permitindo estabelecer medidas para planejar o uso do solo (XAVIER; SILVA, 2018).

Segundo Luiz (2014), os modelos de mudança de uso e cobertura da terra (*LUCC - Land Use and Land Cover Change*) são capazes de prever cenários futuros ao compreender o funcionamento dos eventos que podem levar a alterações no uso do solo. Entre esses modelos, destaca-se o *Land Change Modeler* (LCM), que é amplamente utilizado em todo o mundo para análises de mudanças no uso e



cobertura, bem como uma ferramenta de suporte em estudos relacionados à área ambiental (XAVIER; SILVA, 2018).

Por meio do *software* TerrSet, é viável utilizar o modelo LCM para analisar e identificar alterações na ocupação e cobertura do solo em intervalos de tempo predefinidos. Essa técnica foi criada em 2006 com o intuito de avaliar possíveis mudanças no solo em cenários futuros (SILVA, 2019). O TerrSet calcula e projeta essas alterações a partir da Cadeia de Markov, que é caracterizada como um processo estocástico que permite estruturar as informações dispersas no tempo ou espaço de forma a estabelecer as probabilidades de mudanças futuras (SILVA; CANEPARO, 2017).

Dessa forma, a Cadeia Markov pode ser utilizada como uma técnica capaz de estimar a probabilidade de uma variável se alterar com o passar do tempo, permitindo estipular quanto um território expandirá no futuro com base no uso do solo (BORGES, 2020). De acordo com Preis *et al.* (2021), foi possível utilizar o *software* TerrSet para avaliar as mudanças ocorridas com o uso e ocupação do solo nos anos de 1990, 2000, 2010 e 2015 na bacia hidrográfica do rio Itajaí, em Santa Catarina, fazendo uma estimativa para o uso do solo no ano de 2027 na região. Dessa forma, os autores verificaram que a silvicultura foi a maior causadora de desmatamento na área analisada, tendo um aumento de 48,1% na sua área total e também verificando que a vegetação nativa vai ocupar apenas 55% da bacia hidrográfica, sendo que em 1990, ela ocupava cerca de 67%.

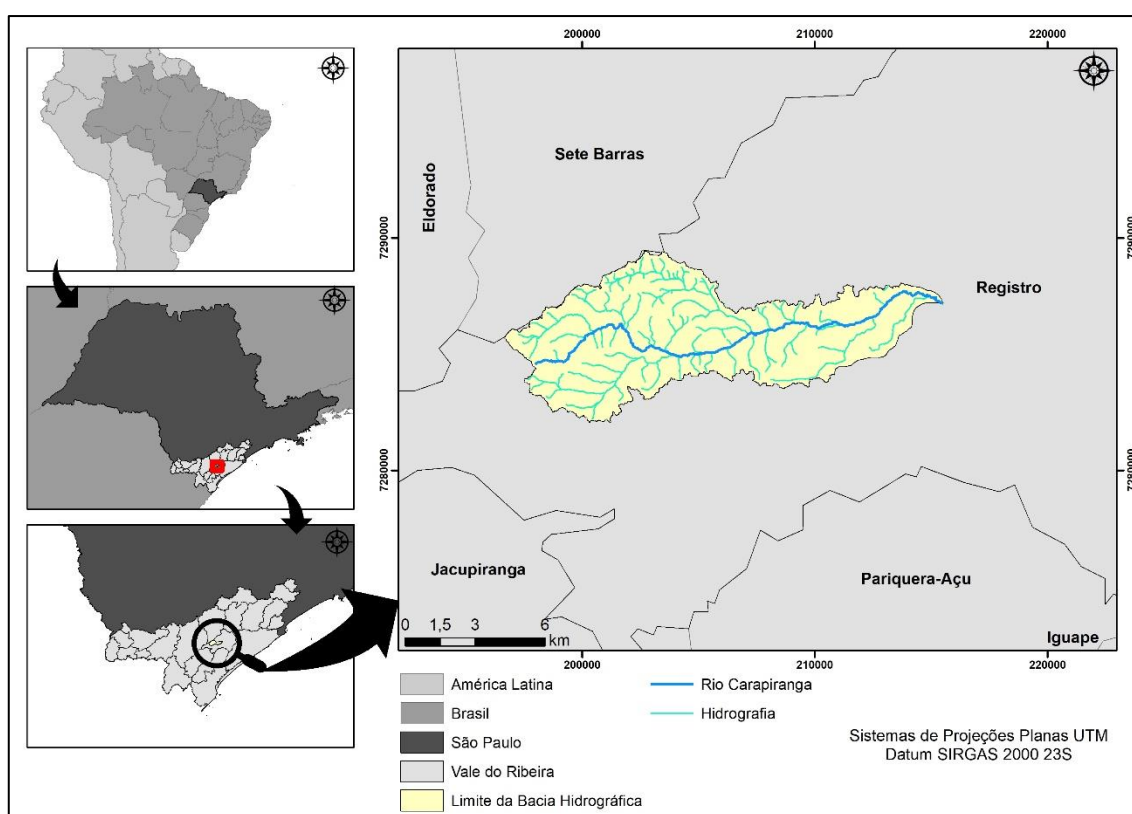
Uma dissertação elaborada por Costa (2019), permitiu estimar o aumento de uma espécie invasora danosa, a *Acacia longifolia*, em um geoparque localizado em Viana do Castelo, por meio da utilização do *software* TerrSet. A partir do uso e ocupação do solo para os anos de 2003 e 2018, foi aplicado o LCM levando em consideração seus principais fatores dinâmicos espaço-temporais, para encontrar o possível cenário futuro da região em 2025 e 2050. Por meio dessa análise, pode-se estabelecer um plano de gestão contendo medidas preventivas que diminuam a quantidade de espécies invasoras e recupere a qualidade e a biodiversidade ambiental do parque.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Carapiranga, possui aproximadamente 6.898 hectares (ha). Está totalmente inserida no município de Registro (SP), o qual pertence ao Vale do Ribeira, na região sul do estado de São Paulo (Figura 1), sendo o principal centro econômico da região (SIGRH, 2021). Segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) para o ano de 2022, o município de Registro tem uma população de 59.947 habitantes e uma extensão territorial 722,2 km<sup>2</sup> (IBGE, 2022).

**Figura 1.** Localização da bacia hidrográfica do rio Carapiranga (SP)



Fonte: Autoria própria.

A bacia possui um clima subtropical úmido com quatro estações bem definidas. Os invernos são frios, com temperaturas ao redor de 13°C, e os verões são quentes, atingindo cerca de 29°C. A precipitação anual varia entre 1.700 e 1.800 mm, enquanto a temperatura média anual é aproximadamente 23°C (DIAS; OLIVEIRA, 2015). De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima da região é categorizado como Cfa - Cfb. Esse tipo de clima apresenta uma temperatura média acima de 18°C em seu mês com as temperaturas mais altas, com flutuações entre 24

e 25°C em janeiro e fevereiro, e uma média anual de precipitação em torno de 1.500 mm (ALVARES et al., 2013).

Na bacia hidrográfica há presença de culturas agrícolas com destaque para a bananicultura, área urbanizada e áreas com presença de florestas. Este rio desagua no rio Ribeira de Iguape, o qual é o principal rio da região e que desagua no Complexo Estuarino-Lagunar de Iguape-Cananéia (DIAS; OLIVEIRA, 2015; SIGRH, 2021).

## **4.2. MATERIAIS**

Os materiais utilizados neste trabalho estão presentes na subsequente lista:

- Software ArcGis 10.6 (ESRI, 2016);
- Software Terrset 18.10 (CLARK LABS, 2015);
- GRASS 7.8.3;
- Mapa pedológico do Estado de São Paulo (2017);
- Imagem do satélite japonês Alos-Palsar;
- NetErosividadeSP;
- MapBiomas (2019).

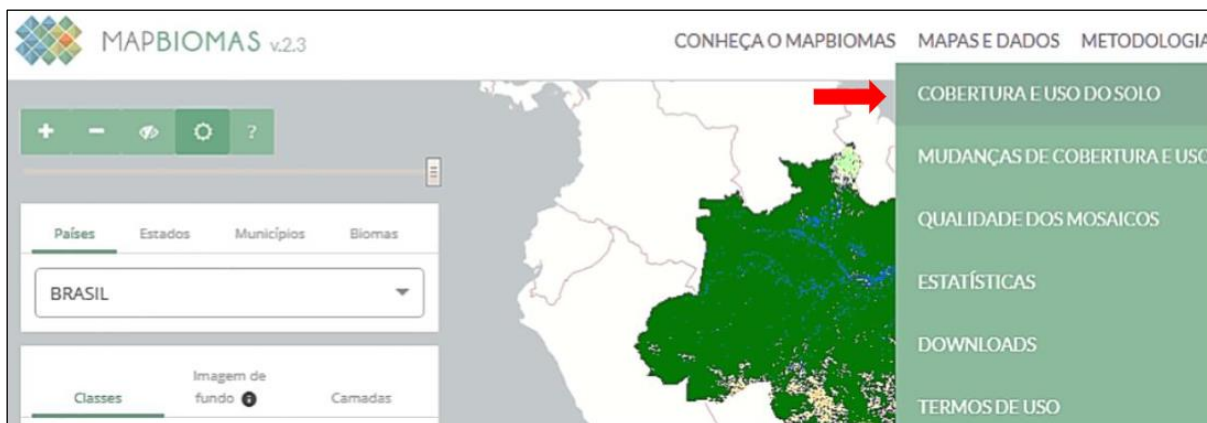
## **4.3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

### **4.3.1. USO E COBERTURA DA TERRA**

Por meio do MapBiomas, foi possível exportar o uso e cobertura da terra para os anos de 2010 e 2018, para fazer o monitoramento das mudanças ocorridas ao longo de 18 anos. Dessa forma, pode-se encontrar no menu de Mapas e Dados, a seção “Cobertura e uso do solo”, que possibilita gerar informações cartográficas tanto de cobertura, quanto de transições de classes para países, estados, municípios e biomas (LIMA et al., 2017).

Para o município de Registro, obteve-se classes de mata nativa, agricultura, áreas de solo exposto, corpos d’água e urbanas. Além disso, também foi possível gerar planilhas com dados referentes aos dois anos avaliados, assim como estatísticas no formato de gráficos.

**Figura 2.** MapBiomas para cobertura e uso do solo.



Fonte: ALMEIDA *et al.* (2018)

Para encontrar o uso de 2020, utilizou-se o Google Earth Pro para retificar as classes de uso e ocupação da terra, seguindo as diretrizes do “Manual Técnico de Uso da Terra”, disponível no IBGE para o nível 2 (IBGE, 2013).

#### 4.3.2. USLE

Para estimar as perdas de solos na área de estudo foi utilizada a metodologia proposta por Wischmeier e Smith (1978), cujo cálculo da perda de solo por erosão hídrica é obtido através da *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Esta metodologia permite estimar a perda de solo média anual em diferentes condições de uso e cobertura da terra variação climática, relevo e adoção de práticas conservacionistas, de modo a determinar áreas que apresentam maiores ou menores perdas de solos. A USLE é expressa pela Equação 1:

$$A = R . K . LS . C . P \quad (1)$$

Sendo:

A é a perda de solo por unidade de área no tempo ( $t.ha^{-1}$ );

R é o fator de erosividade da chuva ( $MJ.mm.h^{-1}.ha^{-1}$ );

K é o fator de erodibilidade do solo ( $t.ha.h/ ha.MJ.mm$ );

LS é o fator topográfico (adimensional);

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

P é o fator de prática conservacionista do solo (adimensional).

Os fatores C e P são dependentes das atividades antrópicas, pois estão relacionados às formas de ocupação e uso do solo, não sendo dependentes apenas das condições naturais como os fatores R, K e LS e, portanto, variam ao longo dos anos, o que justifica a análise da perda de solo para os anos de 2010 e 2020. Para o cálculo da estimativa de perda de solo foi utilizado um Sistema de Informação Geográfica (SIG), bem como outros softwares para a edição de planilhas necessárias ao desenvolvimento do estudo.

Segundo estudo elaborado por Borges (2009), foi possível definir 5 níveis de perda de solo para a bacia do rio Carinhanha (MG/BA). Com base nesta classificação, para a bacia hidrográfica do rio Carapiranga utilizou-se os seguintes níveis de classificação de “Nula a Ligeira”, correspondendo de 0 – 15 t.ha-1.ano-1, já a “Moderada” sendo de 15 – 50 t.ha-1.ano-1, a “Alta” de 50 – 120 t.ha-1.ano-1 e “Muito Alta” perdas acima de 120 t.ha-1.ano-1. Essa classificação foi escolhida tendo em vista a falta de algumas classes observadas por Borges (2009), como a de “Muito Forte”, por conta do cenário mais preservado da área de estudo.

#### **4.3.3. ELABORAÇÃO DOS FATORES DA USLE**

A estimativa do Fator de erosividade da chuva (R) foi obtida a partir de dados disponibilizados pelo programa NetErosividadeSP, desenvolvido por Moreira *et al.* (2006) e que utiliza rede neural artificial (RNA), fornecendo, assim, o valor de R para qualquer localidade do Estado de São Paulo. Para o estudo foram coletados os dados de erosividade de 30 pontos aleatórios contemplados dentro da bacia hidrográfica. Após essa etapa, os dados foram plotados no Microsoft Excel e espacializados no ArcGIS 10.6 (ESRI, 2016), de modo a obter um Plano de Informação em *raster*.

O fator de erodibilidade do solo (K) foi obtido de forma indireta através do mapa pedológico do Estado de São Paulo (ROSSI, 2017) disponibilizado pelo Instituto Florestal (IF) na escala de 1:250.000.

O Fator LS foi obtido por meio do *software* de código aberto chave, o Sistema de Apoio à Análise de Recursos Geográficos (GRASS 7.8.3), utilizando a função *r.watershed*, que gera, a partir de algoritmos, os fatores LS. Para tanto, foi utilizada a imagem do satélite japonês ALOS-PALSAR, com resolução espacial de 12,5 m como Modelo Digital de Elevação (MDE).

Os fatores C e P representam fatores antrópicos, ou seja, estão relacionados às formas de ocupação e uso da terra, diferentemente dos demais fatores que são dependentes das condições naturais, tais como os fatores R, K, L e S (SILVA *et al.*, 2018). Para aquisição dos valores C e P foram compilados os resultados de diversos estudos, sendo obtido um valor médio para o fator CP a partir destes estudos, de modo a minimizar as possíveis subjetividades decorrentes dos valores atribuídos aos diferentes usos do solo.

#### 4.3.4. MODELO DE ESTIMATIVA FUTURA

Para a estimativa da Perda de Solo futura para o ano de 2050 na Bacia Hidrográfica do Rio Carapiranga, utilizou-se a metodologia das Cadeias de Markov. Nela, a ferramenta analisa pares de imagens de cobertura de solo e é capaz de gerar resultados em forma matricial representando a probabilidade de transição baseada em teorias, com matrizes de áreas transitórias, em conjunto com imagens de probabilidades condicionais. Pode-se obter os resultados acerca da metodologia por meio da seguinte Equação 2 (CLARK LABS, 2015):

$$\Pi(t + 1) = p_n \Pi t \quad (2)$$

Sendo:

$\Pi t$  é o estado do sistema referente ao tempo (t)

$\Pi(t+1)$  é o estado obtido depois o tempo (t)

$p_n$  são as matrizes de probabilidade de estados que possam acontecer

Os mapas de uso do solo e cobertura da terra, gerados durante a elaboração dos fatores da USLE para os anos de 2010 e 2020, foram submetidos ao módulo *Markov* de mudanças temporais para analisar a transição de suas classes para 2050, a partir do Software TerrSet (CLARK LABS, 2015). Dessa forma, com o auxílio do software foi possível verificar os padrões presentes no par de imagens analisadas e validar a significância das variáveis de transição de acordo com o passar dos anos, para resultar em uma matriz com o resultado mais provável para cada classe analisada (BORGES, 2020; COSTA, 2015).

A partir das transições obtidas a partir do módulo *Markov*, pode-se adicionar o elemento de contiguidade espacial presente no módulo *CA\_Markov*, disponível no Software TerrSet, que combina Autômatos Celulares com a Cadeia de *Markov*, além de Multicritérios e Alocação de Terra Multiobjetivo (MOLA), para a geração do cenário

projetado para o futuro no ano escolhido de análise, contendo a distribuição espacial das transições com a maior probabilidade de ocorrência (COSTA, 2015).

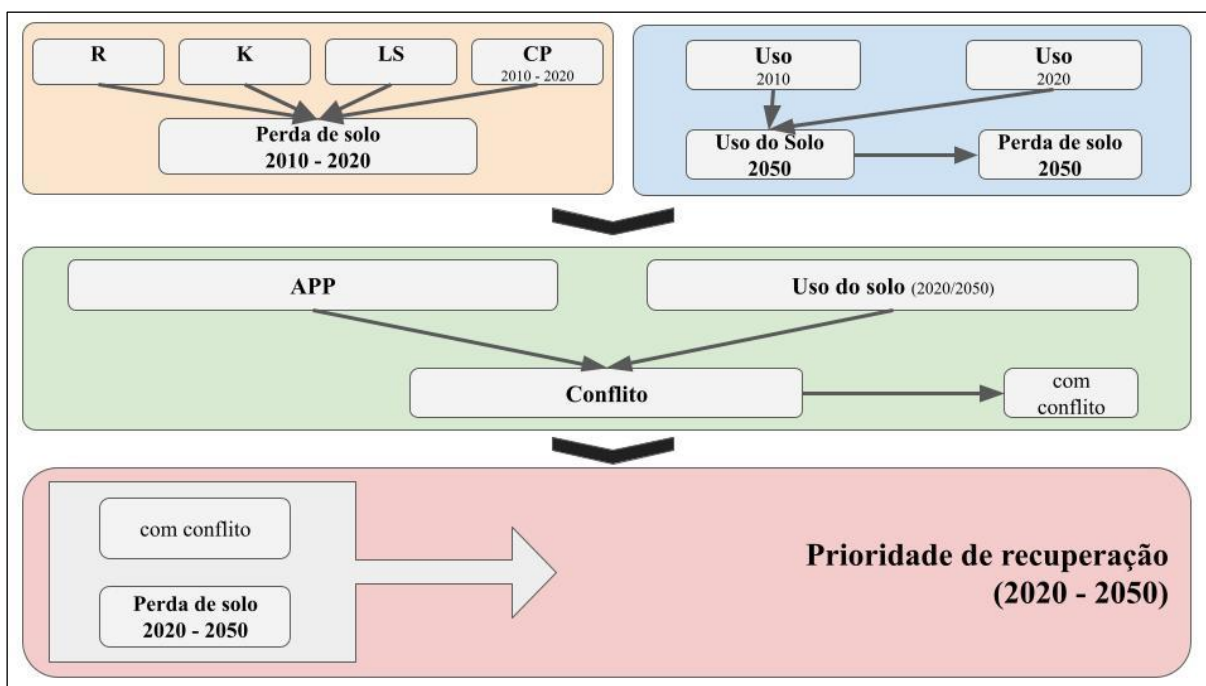
Dessa forma, por meio do Modelo de Estimativa Futura foi possível gerar os mapas preditivos com o cenário do uso da terra para o ano de 2050, contendo as classes de uso da terra e cobertura vegetal. Com isso, calculou-se o fator CP para o ano de 2050, em seguida determinou-se a Perda de Solo para o ano, segundo a Equação Universal da Perda de Solo (SILVA; CANEPARO, 2017).

#### 4.3.5. ANÁLISE E HIERARQUIZAÇÃO DA SITUAÇÃO DAS ÁREAS DE APP

Neste estudo foi analisado se as APPs ao longo dos cursos de água estão preservadas de acordo com Código Florestal de 2012 (Lei nº 12.651/ 2012). As APPs que estão sem cobertura vegetal de proteção e que se apresentam em áreas com alto potencial de carreamento de sedimentos foram identificadas com vistas à priorização de recomposição destas áreas. Para a hierarquização foi levado em consideração a tolerância à perda de solo para cada classe pedológica e tamanho das áreas da APP.

Todo o procedimento metodológico foi desenvolvido com o auxílio do ArcGIS 10.6 (ESRI, 2016) e seu fluxograma de desenvolvimento pode ser visto na Figura 3.

**Figura 3.** Fluxograma da Metodologia aplicada no presente estudo



Fonte: Autoria própria.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

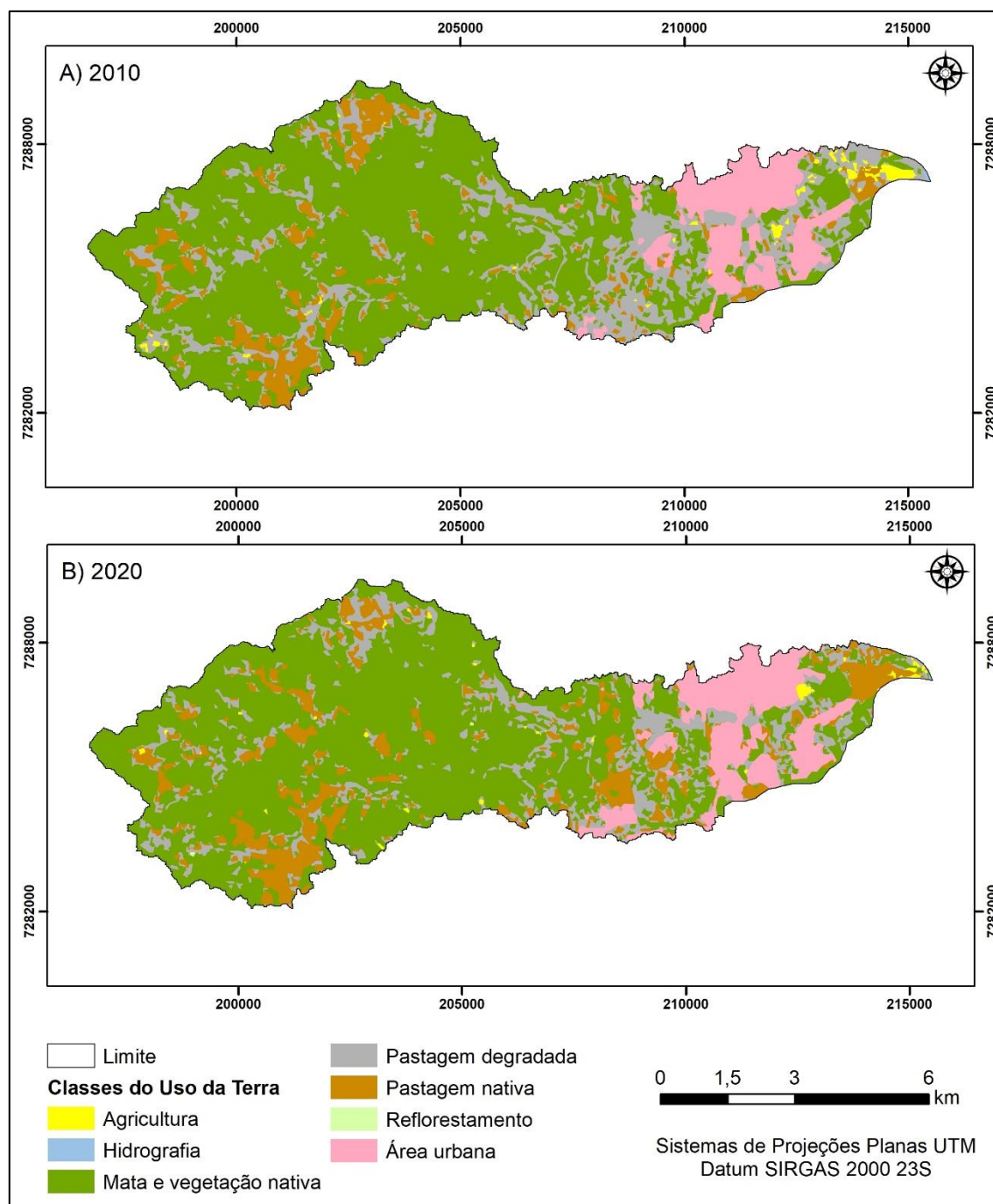
### 5.1. USO E COBERTURA DA TERRA

Analizou-se as informações obtidas acerca do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Carapiranga, em um período de 10 anos, contendo dados referentes aos anos de 2010 e 2020, conforme Figura 4. Em 2010, a classe de mata e vegetação nativa ocupava 60,18% da área total, o que foi equivalente a 4.149,60 hectares, sendo a classe mais significativa na área de estudo, tendo a maior concentração na região central e oeste da bacia. Estudos realizados por Batista *et al.* (2020) também relatam que a mesma classe de uso possui maior predominância na região estudada em maior escala.

Dentro do período avaliado, a classe de mata e vegetação nativa apresentou um aumento de 2,40%, já que a área passou para 4.249,24 ha em 2020. De mesmo modo, a região apresentou a presença de fragmentos de reflorestamento localizados na porção oeste da bacia, sendo equivalente a 0,02% das classes (1,60 ha). Esse fato reforça a necessidade de que exista um maior número de práticas conservacionistas e de preservação em regiões com presença de fragmentos florestais, para que se evite a propagação de outras classes de uso que consequentemente causam desmatamento e podem reduzir a biodiversidade da fauna e flora local, como as de pastagem e agricultura (BATISTA *et al.*, 2020).



**Figura 4.** Mapa de uso da terra e cobertura vegetal para 2010 e 2020, na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga



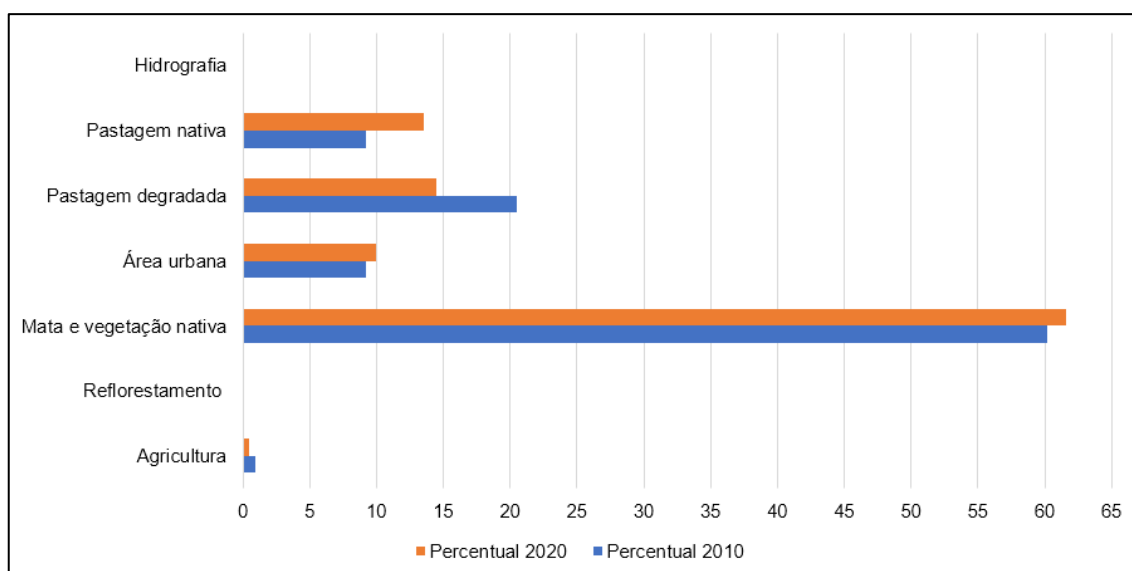
Fonte: Autoria própria.

O município de Registro (SP), no qual a bacia do rio Carapiranga se encontra, não apresenta Unidades de Conservação (UC) e as que estão presentes nos arredores não estão distribuídas igualmente. Sendo assim, para manter áreas remanescentes de floresta nativa, torna-se necessária a criação de regiões protegidas por lei, que contribuem para a preservação das espécies encontradas no local. O Zoneamento Ecológico-Econômico, feito em 2014 pelo governo do Estado de São

Paulo, constata que esta área carece de cobertura vegetal e demonstra a necessidade de estudos serem realizados para a criação de unidades voltadas para o conservacionismo (SMA, 2014).

A classe de maior impacto negativo presente na região nesta época analisada foi a de pastagem degradada que está bem distribuída pelas zonas da bacia, principalmente na parte central e leste e que correspondia a 20,45% em 2010 (1.410,26 ha). Comparando os dois anos, como a Figura 5 demonstra, é notória a diminuição das regiões com pastagem degradada; em contrapartida houve o aumento das pastagens nativas. Juntas, elas representavam 29,69% das classes de uso, já em 2020, esse valor diminuiu para 27,95%, sendo 2047,33 ha e 1.927,60 ha, respectivamente.

**Figura 5.** Gráfico do Percentual das áreas de Uso e Cobertura da Terra em 2010 e 2020



Fonte: Autoria própria.

A área urbana, que se encontra concentrada na parte leste da área de estudo, apresentou um aumento de 7,60%, passando de 635,75 hectares para 684,03 hectares e correspondendo a quase 10% das classes de uso, conforme nota-se na Tabela 1 abaixo. Segundo Batista *et al.* (2020), a região do Vale do Ribeira de Iguape apresenta baixa ocupação urbana e as maiores concentrações de população estão encontradas nas cidades de Registro, Cajati, Apiaí e Iguape.

A área de estudo está inserida na área do Vale do Ribeira de Iguape, que segundo Antuniassi e Reismann (2001) não é própria para a agropecuária, devido ao

relevo ser montanhoso e desigual, ademais, Vicente (2013) afirma que na região de Registro (SP), o relevo apresenta formações irregulares, devido à proximidade com a Serra do Mar. Dessa forma, apesar de ser economicamente vantajoso, deve-se averiguar as melhores práticas analisando sempre os impactos ambientais em cada ação (BATISTA *et al.*, 2020).

**Tabela 1** – Percentual das classes do Uso e Cobertura da Terra em 2010 e 2020.

| Classe                  | 2010      |          | 2020      |          |
|-------------------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                         | Área (ha) | Área (%) | Área (ha) | Área (%) |
| Agricultura             | 60,84     | 0,88     | 32,37     | 0,47     |
| Área urbana             | 635,75    | 9,22     | 1,60      | 9,92     |
| Hidrografia             | 1,97      | 0,03     | 4249,24   | 0,01     |
| Mata e vegetação nativa | 4149,60   | 60,18    | 684,03    | 61,62    |
| Pastagem degradada      | 1410,26   | 20,45    | 996,24    | 14,45    |
| Pastagem nativa         | 637,07    | 9,24     | 931,37    | 13,51    |
| Reflorestamento         | NA        | NA       | 0,65      | 0,02     |
| Total                   | 6895,50   | 100      | 6895,50   | 100      |

Fonte: Autoria própria.

A classe de agricultura, presente em principalmente na parte leste da bacia, diminuiu no ano de 2020, indo para 0,47%, o que é equivalente a 32,36 hectares. A baixa representatividade, e posterior diminuição, da área ocupada por agricultura corrobora com Antuniassi e Reismann (2001) e Vicente (2013).

Variados estudos apontam sobre as consequências das atividades agrícolas e seus impactos ao meio ambiente, principalmente culminando na perda de qualidade do solo e em sua degradação, além de contribuir com a escassez dos recursos hídricos (ALVES, 2021; OLIVEIRA *et al.*, 2002; TONIOLO *et al.*, 2020). Desse modo, onde ainda permanecer a atividade, é notória a necessidade de adoção de práticas voltadas para a agricultura sustentável, com técnicas de manejo apropriadas e práticas de conservação (BATISTA *et al.*, 2020).

## 5.2. PERDA DE SOLO

A partir dos dados obtidos de R, foi possível estimar o fator de erosividade da chuva para a região da bacia hidrográfica do rio Carapiranga, sendo que o local estudado apresentou o valor mínimo corresponde a 6813,84 MJ.mm.h<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> e o valor máximo de 7.067,08 MJ.mm.h<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup>, estando dentro dos padrões encontrados previamente no estudo feito na região do Vale do Ribeira Paulista (SIMONETTI, 2022).

Segundo a pesquisa realizada por Simonetti (2022) a área analisada (Vale do Ribeira Paulista) apresentou grande variação em seu fator de erosividade da chuva (R), no qual se encontra entre 5.360,60 MJ.mm.h<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup> e 9.278,75 MJ.mm.h<sup>-1</sup>.ha<sup>-1</sup>. Dentre as regiões observadas, o Norte e Nordeste foram as que indicaram os maiores indícios de erosão proveniente da chuva, em contrapartida, a porção Sul do local apresentou os valores menores de erosividade, assim como a parte Sudoeste (BATISTA *et al.*, 2020).

Dessa forma, averiguando a classificação previamente feita na região, na qual dividiu-se cinco classes para categorizar as áreas de acordo com o seu potencial erosivo, segundo Carvalho (2008), nota-se que o local de estudo se encontra em uma região com fatores estando em intervalos moderados a fortes ( $4.905,0 < R \leq 7.357,0$ ).

Pode-se também estimar o Fator R a partir de dados pluviométricos, em locais com boa distribuição pluviométrica e efetuar a produção de mapas de isolinhas, que de acordo com Wischmeier e Smith (1965) conseguem efetuar o mapeamento dos pontos que possuem índices de erosividade iguais, ligando-os com o auxílio de linhas. Devido ao fato de o país possuir vastas regiões com grande potencial agrícola, além de áreas com inclinações do relevo mais acentuadas e alta pluviosidade, torna-se necessário a elaboração destes mapas. Essas informações acerca das linhas podem suprir a falta de dados que permitem determinar os índices de erosão em locais que apresentam poucas informações (OLIVEIRA, 2009).

A suscetibilidade dos solos à erosão é representada pelo fator de erodibilidade, definido como Fator K, que é determinado pelas propriedades intrínsecas do solo. Essas propriedades incluem a textura, a estrutura, o teor de matéria orgânica e a permeabilidade do solo. Solos com texturas mais finas, como os argilosos, tendem a ser mais suscetíveis à erosão devido à sua menor permeabilidade e maior tendência a formar crostas superficiais. Por outro lado, solos arenosos, apesar de serem mais permeáveis, podem ser erodidos mais facilmente quando desprovidos de cobertura vegetal. Além disso, a estrutura do solo, que se refere à forma como as partículas estão agregadas, e o teor de matéria orgânica, que melhora a coesão entre as partículas, também desempenham papéis cruciais na resistência à erosão. Portanto, mesmo em condições similares de cobertura vegetal e declividade, diferentes tipos de

solo podem apresentar variações significativas em sua suscetibilidade à erosão (AMORIM *ET AL.*, 2010; OLIVEIRA *ET AL.*, 2015; SILVA, SANTOS, 2018).

Desta forma, segundo o mapa pedológico do Estado de São Paulo, obteve-se o fator de erodibilidade do solo, que apresentou o seu valor máximo de 0,061 ton.ha.h/ha.MJ. mm, sendo caracterizados como solos presentes na classe pedológica de organossolo. Os valores referentes a cada classe de solo podem ser observados na seguinte Tabela 2 (ROSSI, 2017).

**Tabela 2** - Fator K para cada classe de solo.

| Classes pedológicas                       | Fator K ((t/ha).(MJ.mm/ha)) |
|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Afloramento rochoso <sup>(4)</sup>        | 0,0000                      |
| Área urbana <sup>(4)</sup>                | 0,0000                      |
| Argissolo vermelho amarelo <sup>(1)</sup> | 0,0466                      |
| Cambissolo háplico <sup>(1)</sup>         | 0,0254                      |
| Chernossolo argilúvico <sup>(2)</sup>     | 0,0282                      |
| Espodossolo humilúvico <sup>(1)</sup>     | 0,3267                      |
| Gleissolo háplico <sup>(1)</sup>          | 0,0044                      |
| Gleissolo sálico <sup>(3)</sup>           | 0,2190                      |
| Gleissolo tiomórfico <sup>(3)</sup>       | 0,0040                      |
| Latossolo amarelo <sup>(1)</sup>          | 0,0570                      |
| Neossolo flúvico <sup>(3)</sup>           | 0,0430                      |
| Neossolo litólico <sup>(3)</sup>          | 0,0390                      |
| Organossolo háplico <sup>(4)</sup>        | 0,0610                      |
| Organossolo tiomórfico <sup>(4)</sup>     | 0,0610                      |
| Hidrografia <sup>(4)</sup>                | 0,0000                      |

Fonte: <sup>(1)</sup>Mannigel *et al.* (2002), <sup>(2)</sup>EMBRAPA (2009), <sup>(3)</sup>Caldas *et al.* (2019), <sup>(4)</sup>Silva; Alvares (2005).

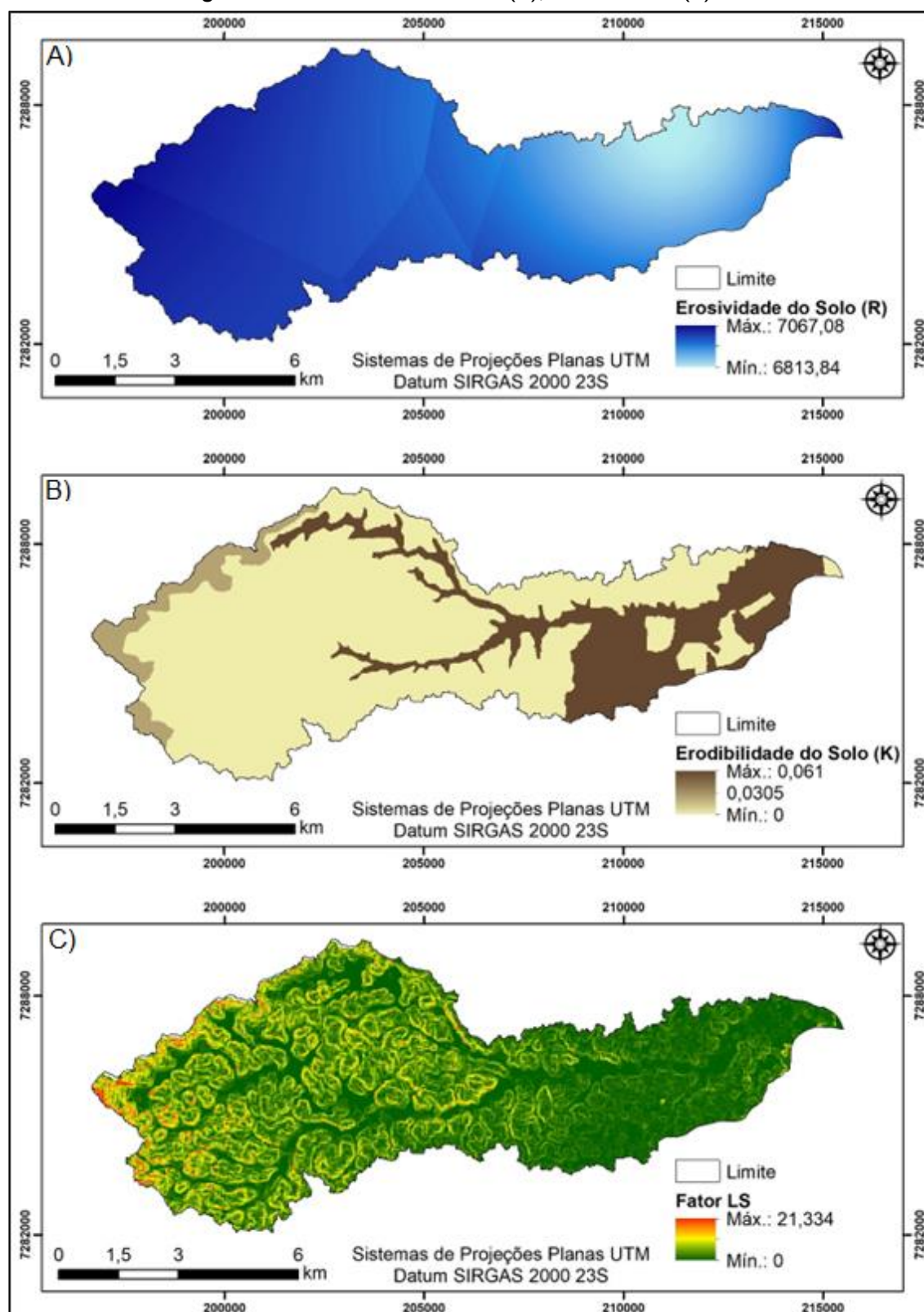
O fator LS, no qual o L é referente a extensão da encosta e o S a declividade presente na vertente, é de grande importância nas análises de solo e de erosão, permitindo observar a dinâmica entre a perda e conservação de solos. Dentro do estudo, o fator apresentou um valor máximo de 21,334 para a bacia analisada, enquanto o menor valor encontrado foi zero. Quanto maior for o LS, mais susceptível a erosão a região vai estar, desse modo, seu manejo deverá apresentar maior rigorosidade.

Já os fatores C e P foram obtidos por meio da compilação dos dados obtidos em diversos estudos, o fator C é relacionado com uma área normalmente com solo sem cobertura vegetal, que está perdendo solo em uma área que ocorre algum tipo de manejo. O fator P pode ser definido como a relação entre a quantidade de solo perdida em uma atividade de conservação específica e a quantidade correspondente

de solo encontrada no cultivo ao longo da direção do terreno (WISCHMEIER; SMITH,1978).

Para a área de estudo, elaborou-se os mapas de Erosividade (R), Erodibilidade (K) e LS, para auxiliar nas análises a respeito do solo da bacia, conforme demonstra a Figura 6 a seguir. Com isto, foi possível encontrar a perda de solo média da área de estudo e propor meios para amenizar os impactos erosivos.

**Figura 6.** Fatores de Erosividade (R), Erodibilidade (K) e LS

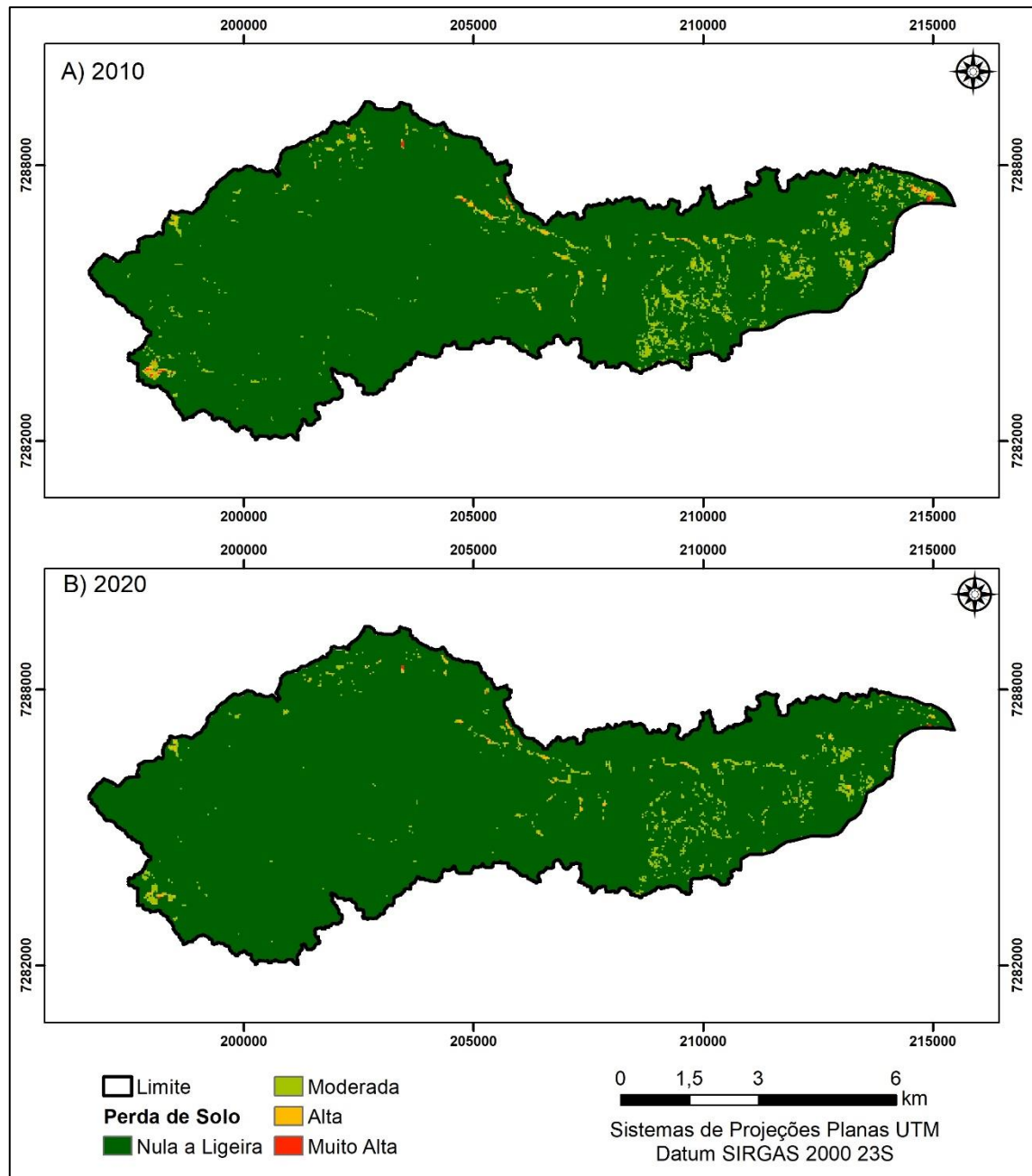


Fonte: Autoria própria.

Com os resultados encontrados, foi possível estimar que a bacia hidrográfica do rio Carapiranga possui uma perda de solo média de  $142.227,4 \text{ t.ha}^{-1}.\text{ano}^{-1}$ . As

regiões que apresentam a maior perda de solo são as que estão na porção leste e central da bacia, sendo que coincide com a área de maior erodibilidade e erosividade, conforme observado nos mapas apresentados anteriormente. Um estudo realizado por Silva (2010), no qual estimou-se os fatores de Erosividade e a perda de solo no Vale do Ribeira, encontrando um valor aproximado de 10.152 MJ mm h.ha-1.ano, que foi próximo ao encontrado neste trabalho.

**Figura 7.** Perda de Solo da bacia hidrográfica do rio Carapiranga (SP)



Fonte: Autoria própria.

Apesar da perda de solo não ser distribuída uniformemente, existem fragmentos na porção leste e a sudoeste na bacia que apresentam os maiores valores



de perda. Somando-se a isto, a parte centro-leste é onde está localizado a maior concentração da perda de solo na bacia do rio Carapiranga, em ambos os anos, como pode-se analisar na Figura 7 acima.

Na parte oeste, nota-se que é o local no qual o Fator LS apresenta seus valores mais altos, sendo assim, apresentam alta declividade, com vasta largura de rampa e vão possuir maior influência no processo de carreamento do solo. Além disso, analisando o Uso da Terra é possível observar que essa região apresenta áreas com pastagem nativa, degradada e alguns focos de agricultura, logo, por conta destes fatores, a área apresentou alta perda de solo através da USLE (Magalhães *et al.*, 2014).

As regiões leste e centro-leste, apesar de possuírem o relevo sem tanto declive, apresentaram os maiores valores do Fator K, assim como é onde se encontra a área urbana da bacia, o que também contribui com não só a degradação do solo, como sua poluição e contaminação. A classe de agricultura demonstrou-se bem predominante na porção leste, assim como áreas contendo pastagem degradada e pastagem nativa, o que contribuiu com o resultado encontrado da região ser considerada de risco à perda de solo pela erosão (MAGALHÃES *et al.*, 2014).

Além da perda de solo anual averiguada em cada região, realizou-se uma análise dos anos de 2010 e 2020, e observou-se que em 2010 a maior parte da área apresentava uma perda de solo nula a ligeira, equivalente a 96,27% da área. Em 2020, houve um aumento de 1,64% na classe nula a ligeira, passando de 6.622,82 hectares para 6.734,50 hectares.

**Tabela 3 – Percentual de Perda de Solo em 2010 e 2020.**

| Classe         | 2010      |          | 2020      |          |
|----------------|-----------|----------|-----------|----------|
|                | Área (ha) | Área (%) | Área (ha) | Área (%) |
| Nula a Ligeira | 6622,82   | 96,27    | 6734,50   | 97,91    |
| Moderada       | 215,05    | 3,13     | 120,47    | 1,75     |
| Alta           | 35,67     | 0,52     | 21,65     | 0,31     |
| Muito Alta     | 6,02      | 0,09     | 1,85      | 0,03     |

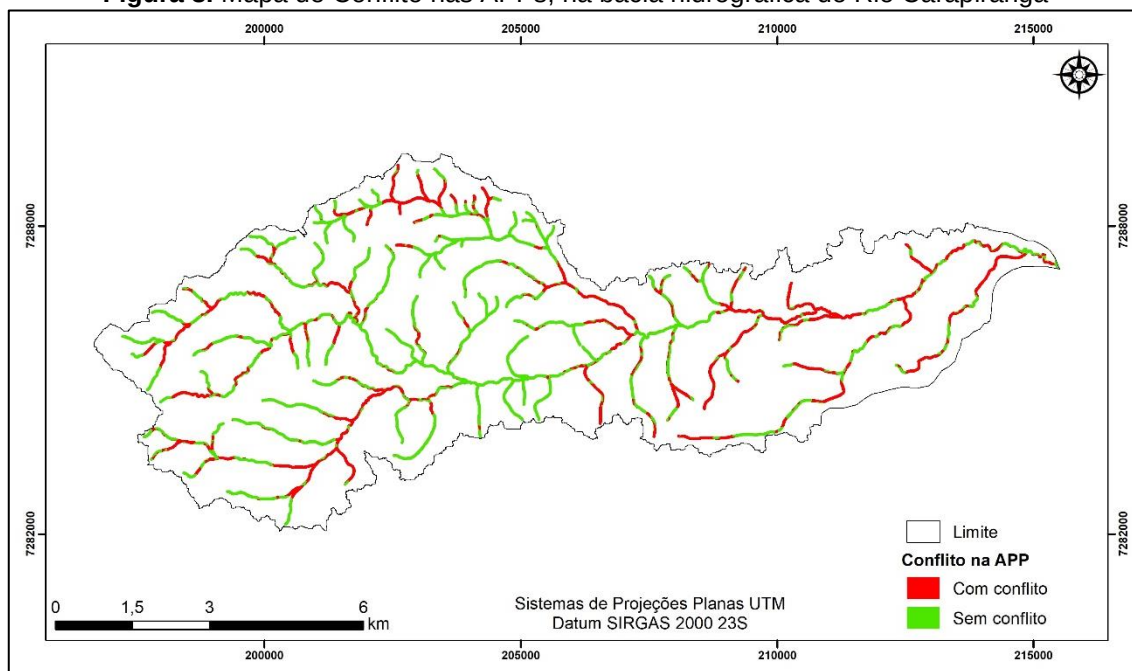
Fonte: Autoria própria.

Em contrapartida, as regiões classificadas como moderada (de 3,13% para 1,75%), alta (de 0,52% para 0,31%) e muito alta (de 0,09% para 0,03%) perda de solo apresentaram diminuição em 2020. Esse fato está em acordo com o observado nos dois anos, já que os locais que demonstraram certa melhoria eram classificados como pastagem degradada, mas passaram para pastagem nativa ou área de reflorestamento de eucalipto. Logo, com a maior cobertura do solo, a vegetação consegue agir como uma barreira de proteção contra a erosão, estando entre o solo e as gotas de chuva, portanto realizando esta interceptação, o que contribui para a diminuição do escoamento superficial e aumenta a infiltração do solo, assim como os índices de umidade (ROCHA *et al.*, 2019).

### **5.3. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE**

Na Figura 8, é possível observar o mapa de conflito nas áreas de APP. A partir dele, foi possível analisar que dos 783,53 hectares de APP, 38,68% não estão em conformidade com a lei e a área não apresenta cobertura vegetal, sendo que 61,32% estão de acordo com a legislação vigente no país.

Para efetuar os planejamentos territoriais, é imprescindível o conhecimento acerca das APPs, além de contribuir com a fiscalização da região e as tomadas de decisão a campo, nos aspectos locais, regionais e nacionais, já que contribuem com os agentes fiscalizadores e o cumprimento da legislação ambiental (COUTINHO *et al.*, 2013).

**Figura 8.** Mapa de Conflito nas APPs, na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga

Fonte: Autoria própria.

Dentro do analisado, as áreas conflitantes da bacia hidrográfica são as de urbanização, agricultura e pastagem nativa e degradada, segundo as classes de uso da terra. Conforme Ribeiro *et al.* (2005), a falta da demarcação oficial das áreas de preservação contribui para que não haja o cumprimento da legislação, sendo propícia a ocupação não legal do solo. A presença do conflito no rio Carapiranga é um sinal de que a região apresenta uma baixa fiscalização, porque essas áreas deveriam estar em processo de recuperação e ser destinadas apenas para a preservação vegetal, ressaltando a necessidade de monitoramento no local (COUTINHO *et al.*, 2013).

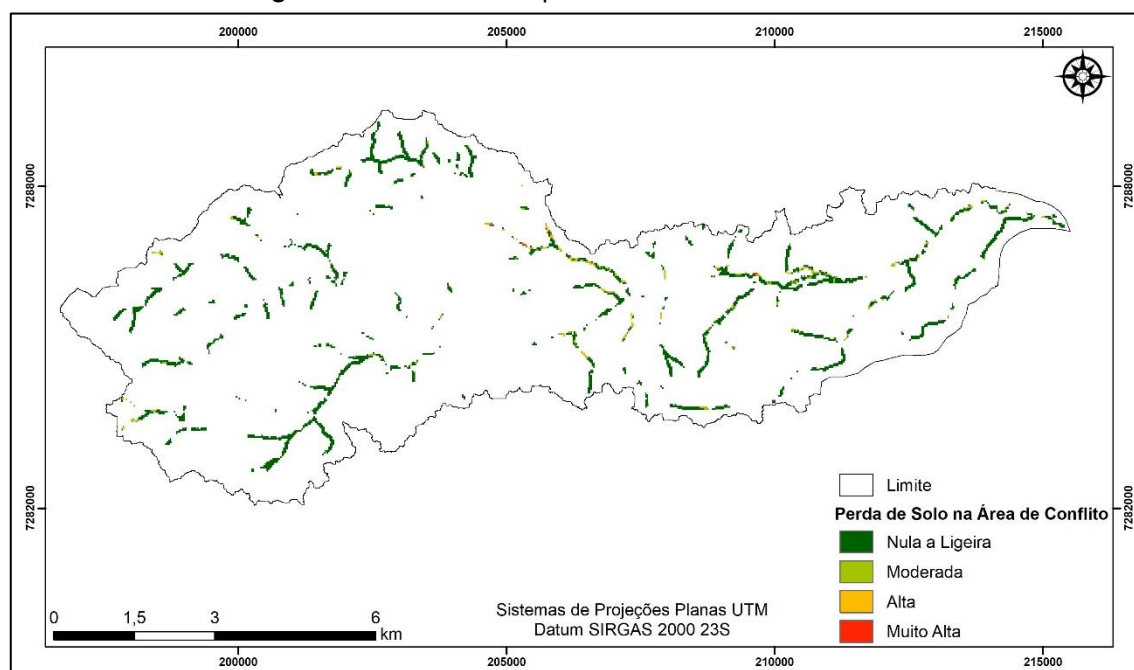
#### 5.4. HIERARQUIZAÇÃO

Por meio dos mapas gerados, pode-se estabelecer uma hierarquia para determinar as áreas que necessitam maior prioridade para serem recompostas. Com a falta de cobertura vegetal, ocasionada pelas áreas de conflito na bacia, nota-se que essas áreas serão mais propensas para a perda de solo.

Em suma, por meio dos resultados encontrados com a perda de solo, apresentando as áreas com os valores com as maiores perdas, em conjunto com as regiões em conflito na bacia e determinou-se as regiões com o maior potencial de escoamento superficial, com o carreamento de solos.

Dessa maneira, a fim de encontrar valores concretos, elaborou-se um mapa contendo ambas as áreas de conflito e regiões com maior perda de solo, como demonstra a subsequente Figura 9. Constatou-se que a região do Centro-Leste é a que deverá possuir maior prioridade, já que apresentou a perda de solo mais alta dentre as outras. Em seguida, a região oeste, norte e sul da bacia, em ordem.

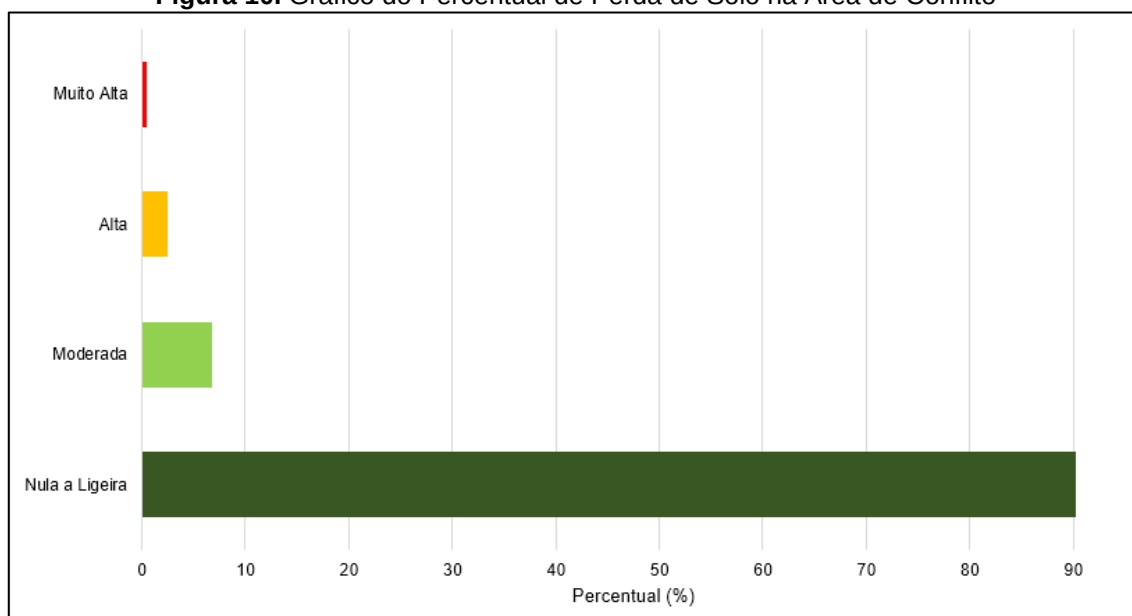
**Figura 9.** Perda de Solo presente nas Áreas de Conflito



Fonte: Autoria própria.

A partir dos valores obtidos, determinou-se que 90,29% da área do estudo apresenta uma perda de solo de nula a ligeira, sendo a mais significativa que corresponde a 257,06 hectares. Em seguida, 6,73% do total demonstra a perda de uma maneira moderada, com 19,17 hectares, estando a alta com 2,54%, 7,22 hectares e muito alta com 0,45%, finalizando com 1,27 hectares, como consta na Figura 10.

Devido ao solo estar predominantemente na classe dos organossolos, nota-se que eles são ecologicamente mais frágeis, apresentando horizontes orgânicos que são mais facilmente carregados com a chuva, possuindo uma baixa intensidade de intemperismo, tornando este solo mais sucessível a erosão. Além da influência do relevo acidentado, que contribui com o escoamento, quando estão perto de recursos hídricos ou em matas ciliares, o seu uso deve ser restrito, segundo Silva (2015). Com o desprendimento das partículas e o escoamento superficial, consequentemente o cenário se torna propício para os processos da erosão hídrica (RIBEIRO, 2016).

**Figura 10.** Gráfico do Percentual de Perda de Solo na Área de Conflito

Fonte: Autoria própria.

Apesar do Vale do Ribeira ser considerada uma região rica em recursos hídricos, a sua distribuição não é igualitária, havendo carências em certas localidades. O município de Registro é classificado como pobre em água, sendo que nesta região também existe baixa disponibilidade de águas subterrâneas, por conta de sua formação ser dada por rochas cristalinas, característica que corrobora para conter aquíferos fraturados, com vazões mínimas (SMA, 2014).

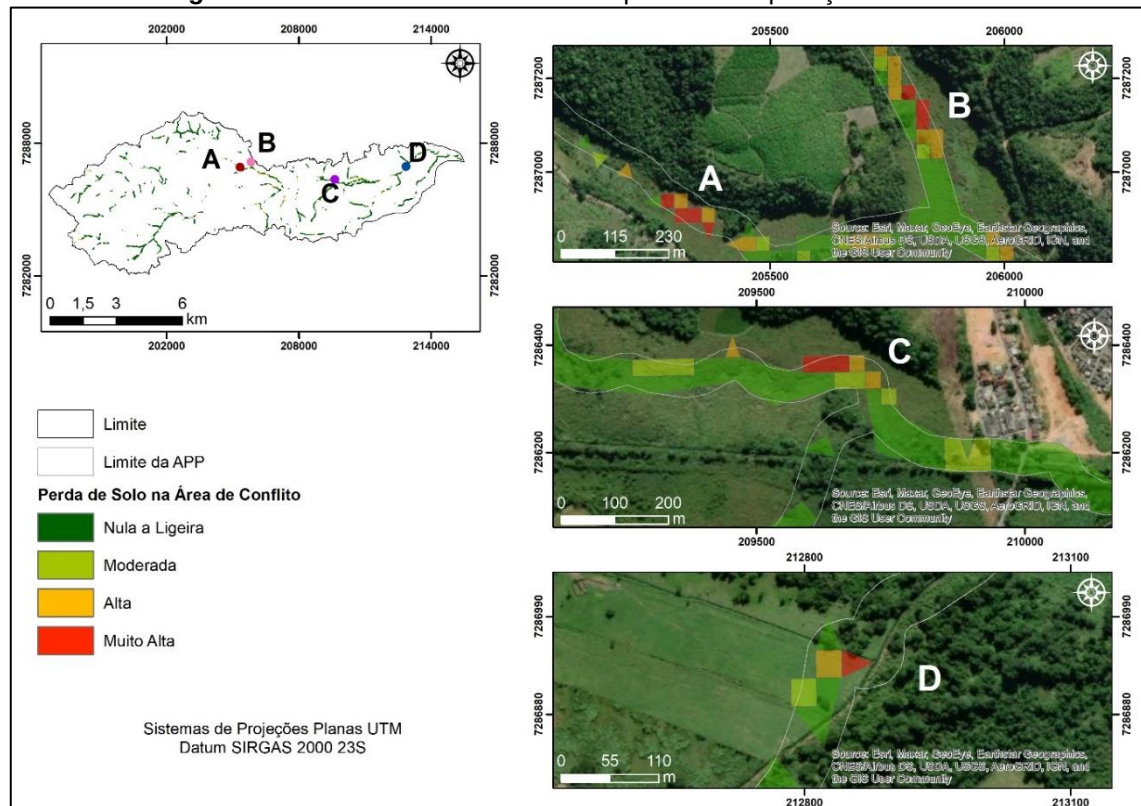
Desse modo, com o alto carreamento de solo nesta região, espera-se que o rio Carapiranga sofra com a diminuição do seu leito, por conta do assoreamento, o que afeta não apenas a disponibilidade hídrica do local, mas também toda a biota aquática. Reverter o assoreamento não é uma tarefa fácil, devido ao aumento de partículas sólidas em suspensão e dissolvidas no rio, contudo, pode ser feito com um bom planejamento e estudo da região.

Uma das técnicas que podem minimizar ou anular os impactos do assoreamento é a recomposição das matas ciliares. As raízes das árvores protegem o solo dos processos erosivos, devido a sua capacidade de reter o solo, impedindo que ele seja carregado pela chuva. Já as copas também são importantes por diminuir o impacto da gota da chuva no solo e por criar uma camada de serrapilheira no chão, que contribui para recobrir o solo e quanto mais coberto ele estiver, menor serão os impactos erosivos no local (CASTRO *et al.*, 2013).

Sendo assim, primeiramente deve-se analisar quais os locais que constam como áreas com perda de solo muito alta dentro do estudo ambiental, para propor sua

recuperação a partir de técnicas como a de recomposição da mata ciliar. Dentro do trabalho proposto, selecionou-se quatro áreas que apresentam uma perda de solo alta na bacia do rio Carapiranga, sendo estas as com maior urgência de recuperação, conforme demonstra a subseqüente Figura 11.

**Figura 11.** Análise das áreas voltadas para a Recuperação Ambiental



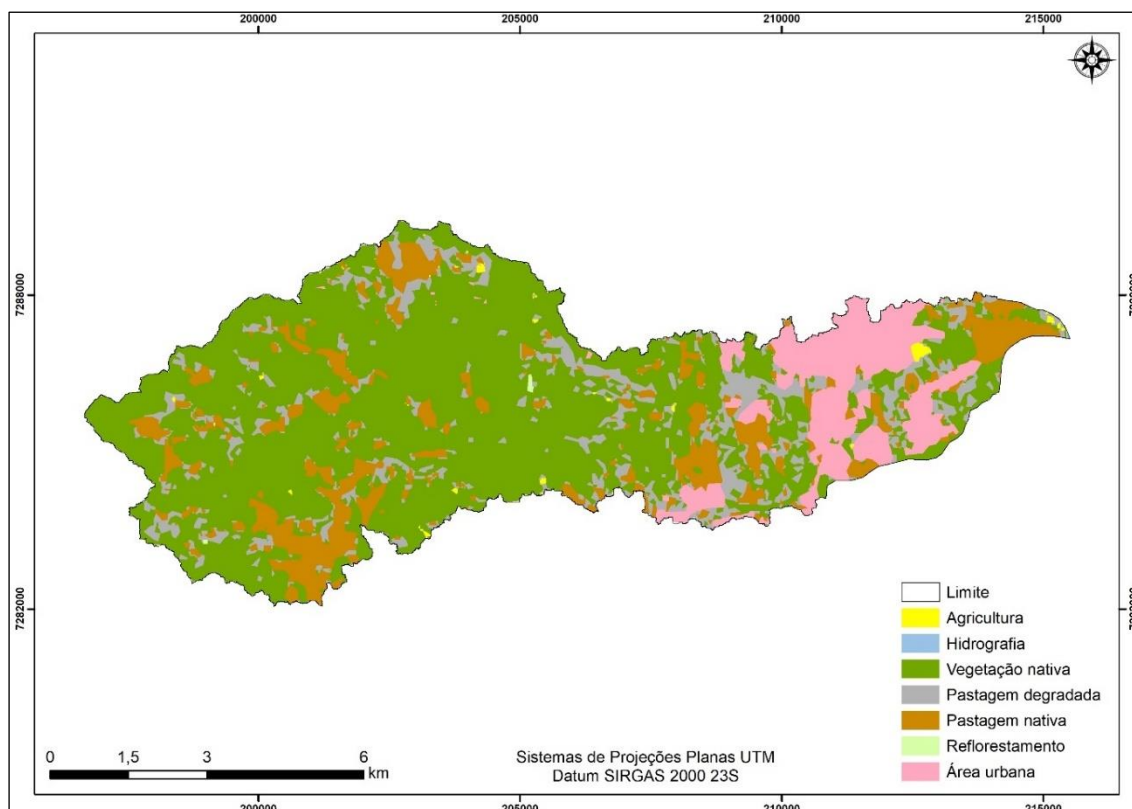
Fonte: Autoria própria.

Por conseguinte, para mitigar esses problemas ambientais, deve-se elaborar um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, voltado para descrever a melhor maneira de planejar, executar e monitorar a recuperação ambiental da bacia. Essas áreas devem apresentar vegetação nativa, para que estejam em conformidade legal e atuem diretamente na redução do impacto ambiental.

### 5.5. ESTIMATIVA DE USO E COBERTURA DA TERRA 2050

Por meio dos mapas de uso da terra e cobertura vegetal encontrados para os anos de 2010 e 2020, pode-se fazer uma estimativa para o ano de 2050, por meio das cadeias de Markov. Dessa forma, verificou-se as alterações nas classes de uso e cobertura da terra, conforme a Figura 12.

**Figura 12.** Mapa de uso da terra e cobertura vegetal 2050, na bacia hidrográfica do rio Caraprianga



Fonte: Autoria própria.

Com o resultado gerado, os valores das classes foram quantificados em seus respectivos hectares e percentuais correspondentes conforme a área total analisada dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Carapiranga, sendo possível observá-los na Tabela 4. Para o ano de 2050, a classe mais representativa da região foi a de “Mata e vegetação nativa”, que vai ocupar cerca de 4308,55 hectares e seria equivalente a 62,49% da região. Posteriormente, a segunda classe de maior destaque é a “Pastagem nativa”, que representaria 14,86% da área totalizada, em seguida a classe “Pastagem degradada” com 11,94%, a de Área Urbana com 10,30%, Agricultura corresponderá por 0,34%, Reflorestamento 0,06% e por fim, Hidrografia com 0,01%.

**Tabela 4** – Percentual das classes do Uso e Cobertura da Terra para o ano de 2050.

| Classe                  | Área (ha) | Área (%) |
|-------------------------|-----------|----------|
| Agricultura             | 23,50     | 0,34     |
| Área urbana             | 710,45    | 10,30    |
| Hidrografia             | 0,45      | 0,01     |
| Mata e vegetação nativa | 4308,55   | 62,49    |
| Pastagem degradada      | 823,15    | 11,94    |
| Pastagem nativa         | 1024,26   | 14,86    |
| Reflorestamento         | 3,93      | 0,06     |
| Total                   | 6894,28   | 100      |

Fonte: Autoria própria.

O alto índice percentual de mata e vegetação nativa no futuro é esperado devido às fortes práticas conservacionistas que são encontradas na região. Cerca de 66,7% da área total do Vale do Ribeira, equivalente a 808.116,9 hectares, é destinada à preservação. A presença dessas áreas preservadas no Vale do Ribeira desempenha um papel fundamental na conservação do ecossistema da região, representando uma parcela significativa dele. Dentre essas áreas preservadas, aproximadamente 511.036,9 hectares são remanescentes da Mata Atlântica (ALMEIDA *et al.*, 2016).

Além destes remanescentes, a região também abriga matas, matas em fase de regeneração, várzeas e mangues, que se distribuem em seus seis Parques Estaduais e duas Estações Ecológicas que se encontram completa ou parcialmente integradas no território. Contudo, em certas áreas como bairros rurais, territórios quilombolas e indígenas, também é comum encontrar zonas de preservação (ALMEIDA *et al.*, 2016).

Embora os remanescentes de Mata Atlântica no Vale do Ribeira apresentem uma grande diversidade, a região enfrenta atualmente contrastes significativos devido aos baixos Índices de Desenvolvimento Humano (IDH). Essa disparidade é evidente ao observar que, embora tenham sido estabelecidas Unidades de Conservação, tanto integrais quanto de uso sustentável, a participação efetiva da população no processo de gestão dessas áreas pode se tornar limitada. Enquanto as UCs de proteção integral priorizam a preservação da riqueza natural, as de uso sustentável buscam um equilíbrio entre conservação e desenvolvimento econômico. No entanto, a falta de envolvimento das comunidades ribeirinhas nas decisões relacionadas a essas unidades pode contribuir para a dificuldade em alinhar os interesses locais às estratégias de conservação. É importante ressaltar que a situação socioeconômica da região é complexa e multifacetada, não podendo ser atribuída exclusivamente às

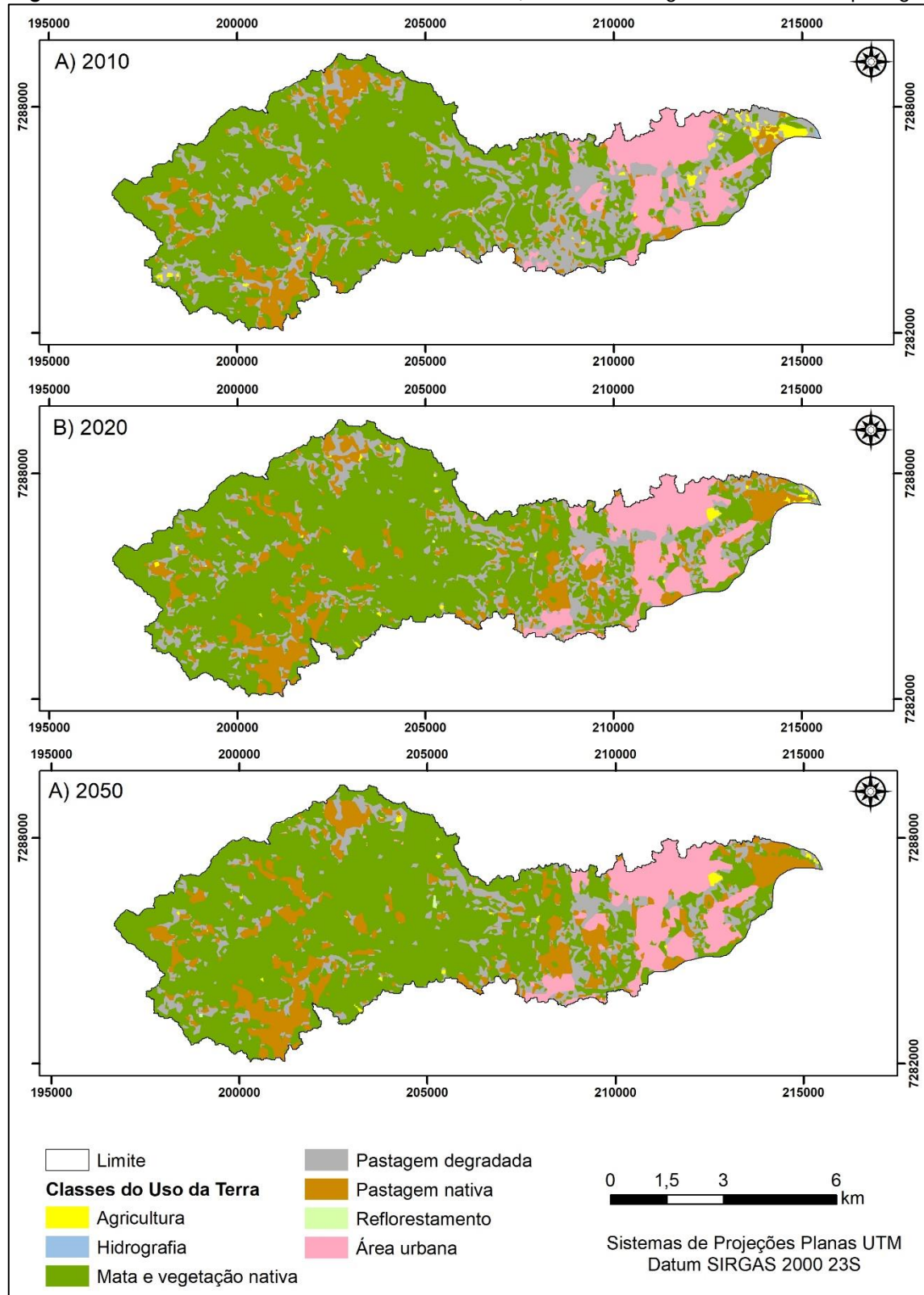


Unidades de Conservação, especialmente considerando que a área urbana representa apenas 10,3% da área total analisada no período (ALVARES, 2018).

#### **5.6. COMPARAÇÃO MULTITEMPORAL DO USO E COBERTURA DA TERRA**

Ao mapear o Uso e Cobertura da Terra para os anos de 2010 e 2020, dentro do período de 10 anos, foi possível observar a mudança das 7 classes presentes na região. A Figura 13 demonstra a evolução por meio de mapas dos Usos e Coberturas da Terra encontrados no período de 2010 até 2050.

**Figura 13.** Uso e Cobertura da Terra de 2010 a 2050, na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga



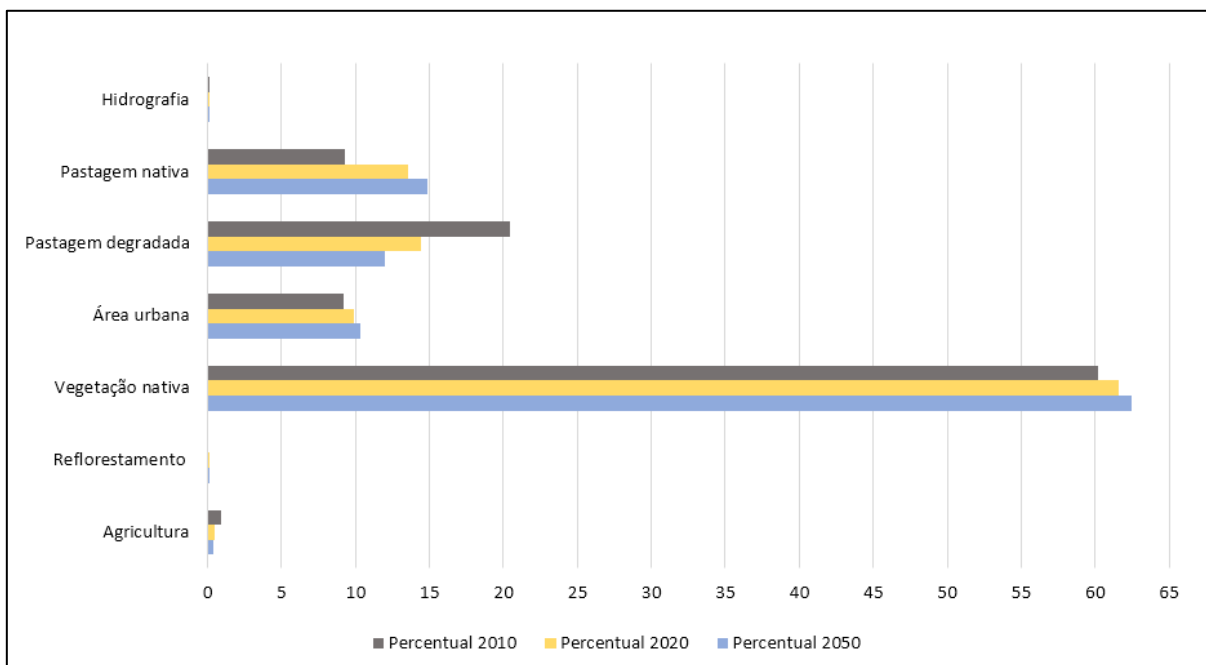
Fonte: Autoria própria.

Após a confecção dos mapas para melhor representação visual da variação multitemporal da região, os valores de área em hectares que cada classe ocupa foram quantificados e transformados em percentual dentro da área avaliada.

Analisando as tendências de evolução dos usos e coberturas de terra ao longo de um período de 40 anos, considerando o passado, presente e projeção futura, torna-se evidente que a classe predominante na Bacia Hidrográfica do Rio Carapiranga é a de mata e vegetação nativa. Ao comparar os três anos de análise, é observado que a área apresenta uma tendência de crescimento dessa classe nos cenários atuais e do futuro.

No ano de 2010, a classe de mata e vegetação nativa ocupava 60,18% da área total. Em 2020, essa proporção aumentou para 61,62%. Seguindo as projeções do modelo de previsão, espera-se que essa classe represente aproximadamente 62,49% da área da bacia no futuro. A Figura 14 a seguir ilustra os usos e ocupações da terra ao longo dos anos, abrangendo o período de 2010 a 2050.

**Figura 14.** Gráfico do Percentual das áreas de Uso e Ocupação da Terra em 2010, 2020 e 2050



Fonte: Autoria própria.

Ao verificar as classes de pastagem, observa-se comportamentos opostos entre elas. A pastagem degradada apresentou uma diminuição considerável, enquanto as áreas de pastagem nativas demonstraram uma tendência de crescimento.

Para 2050, estima-se que a área de pastagem degradada, que compõe a terceira classe de maior representatividade, apresentará uma redução de 41,57% com relação ao seu valor original no local de estudo, já que inicialmente, em 2010, a classe representava 20,45% da bacia e no futuro, estará representando cerca de 11,94% da área.

Um estudo realizado no município de Registro revelou que, no período entre 1987 e 2017, as áreas destinadas à produção de leite e carne sofreram uma regressão. Uma das principais razões para isso é que a pecuária nos municípios de São Paulo têm perdido espaço devido à baixa competitividade em relação à rentabilidade alcançada pela produção desses insumos em outras regiões do Brasil, que são mais adequadas para esse fim. Como resultado, a competição se tornou mais acirrada (CORDEIRO *et al.*, 2017).

Dessa forma, é previsto que em 2050 a segunda classe com maior representatividade seja a de pastagem nativa, ocupando aproximadamente 14,86% da área total do estudo. Essa tendência é justificada pela forte presença das legislações ambientais vigentes na região. Essas regulamentações dificultam o corte e a queima da "capoeira" (vegetação secundária), o que contribui para o abandono dessas áreas e, conseqüentemente, para a recuperação da vegetação natural da região. Esse processo favorece o retorno das áreas de pastagem degradada ao seu estado original de vegetação nativa (CORDEIRO *et al.*, 2017).

A classe de área urbana mostrou um aumento modesto ao longo dos três anos analisados, representando 9,22% em 2010 e com uma estimativa de alcançar 10,30% em 2050. Essa situação está relacionada ao cenário atual na região, porque o Vale do Ribeira, onde a área de estudo está localizada, possui grandes vazios demográficos e uma baixa densidade populacional, com apenas 22,4 hab./km<sup>2</sup>. Comparando essa densidade com a do Estado de São Paulo, que é de 171,7 hab./km<sup>2</sup>, é evidente a baixa taxa de ocupação urbana na região (SEADE, 2016).

Atualmente, o Vale do Ribeira apresenta as menores taxas de crescimento populacional do Estado. Entre os anos 2000 e 2010, a taxa para o Estado de São Paulo foi de aproximadamente 1,09% ao ano, enquanto na região do Vale do Ribeira foi de apenas 0,15% ao ano (ALMEIDA, 2017). De acordo com Alvares (2018), apesar dos esforços para preservar as riquezas naturais da região, a população local ficou

desassistida nesse processo. As comunidades que vivem nas proximidades das áreas de conservação são muitas vezes vistas como ameaças à conservação dos recursos do meio ambiente.

As políticas de conservação locais na região tiveram um impacto positivo no aumento das áreas de reflorestamento. Em 2010, essas áreas não estavam presentes na área analisada. No entanto, em 2020, foi observada a presença de 1,60 hectares destinados a essa classe. Para o ano de 2050, estima-se que aproximadamente 3,93 hectares sejam dedicados a essa prática, representando um aumento percentual estimado de 0,02% para 0,06%.

Relacionado aos percentuais da classe de agricultura, é notória a diminuição das taxas tanto no presente quanto no futuro na bacia. No início, ela representava 0,88% da região, mas em 2020 esse número caiu para 0,47%. Para 2050, estima-se que essa porcentagem seja ainda menor, com aproximadamente 0,34% dedicado à agricultura.

Segundo Arantes *et al.* (2017), a falta de mão de obra e tecnologias tem sido um obstáculo para os avanços dos sistemas de cultivo e produção no Vale do Ribeira. Com a abolição da escravidão, a região passou por uma reestruturação de seus métodos agrícolas, resultando na diminuição dos grandes estabelecimentos agrários ao longo do tempo, ademais, outros empreendimentos tiveram que modificar suas estratégias e atividades de produção.

Nesse contexto, o comércio e a produção de banana ganharam destaque entre os grandes produtores que enfrentavam crises, enquanto os agricultores familiares menores foram limitados a produções voltadas para a subsistência. A população local depende diretamente dos recursos naturais fornecidos pelo ambiente, o que engloba a produção de artesanato de produtos florestais e agrícolas, além de ainda persistir uma prática agrícola rudimentar baseada nos princípios de corte e queima (ARANTES *et al.*, 2017).

A hidrografia do Vale do Ribeira apresentou uma taxa de decréscimo ao longo dos 40 anos de estudo. Em 2010, a área hídrica era equivalente a 1,97 hectares, ou 0,03% do total. Em 2020, esse número caiu para 0,65 hectares, representando apenas 0,01%. As projeções para o futuro indicam que essa classe poderá continuar a diminuir, estimando-se que, em breve, representará apenas 0,45 hectares, ou 0,01%.

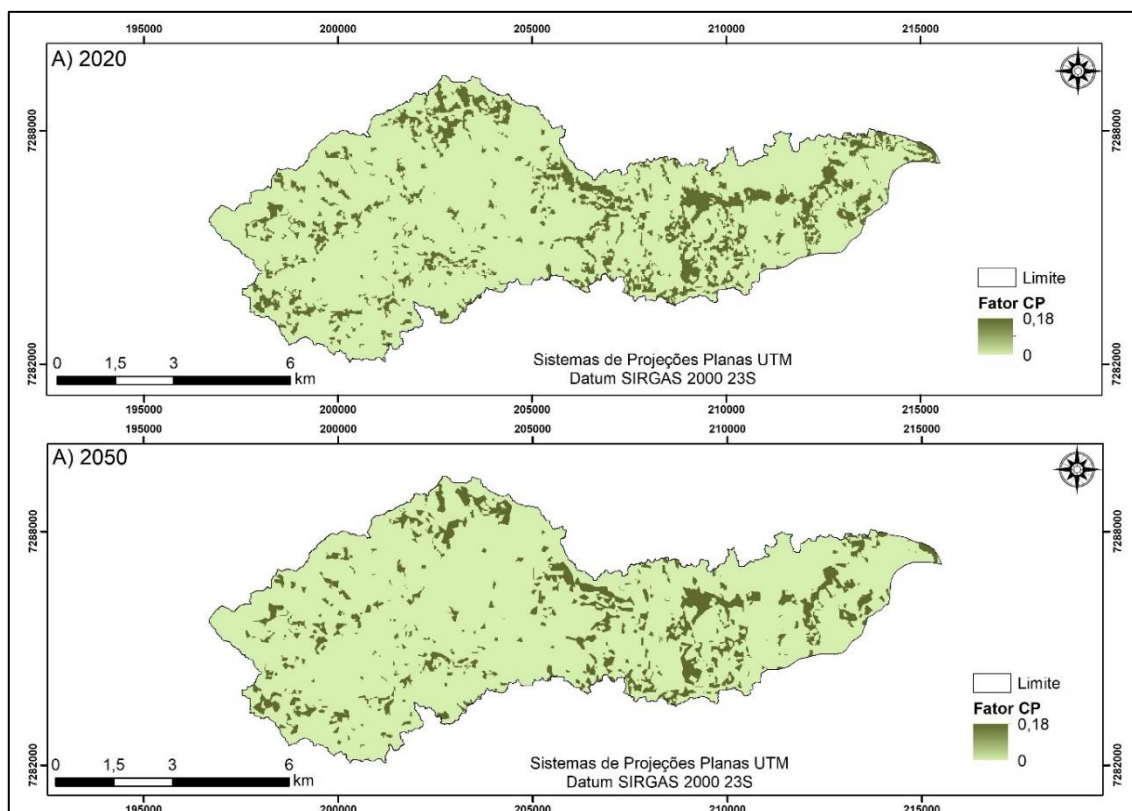
Embora a análise dos dados mostre essa redução, é importante ressaltar que não é possível determinar com precisão as causas dessa diminuição. Fatores como urbanização, desmatamento, mudanças climáticas e práticas de uso do solo podem influenciar a hidrografia da região, mas cada um desses elementos requer uma investigação mais aprofundada para entender suas interações e impactos específicos.

Entre as informações previamente mencionadas acerca da situação atual da região, a baixa escolaridade da população e o alto índice de dispersão são fatores limitantes para o crescimento e desenvolvimento local. Como resultado, o Vale do Ribeira não consegue se destacar em termos de agricultura, agropecuária ou aumento populacional. Essa realidade contribui para a percepção de que a região valoriza as leis e políticas ambientais de conservação, porém, não investe adequadamente em novas tecnologias que possam conciliar o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente.

#### **5.7. ESTIMATIVA FUTURA DO FATOR CP**

A partir do Uso e Cobertura da Terra estimado para o ano de 2050, pode-se estipular o Fator CP para o futuro. Em ambos os anos de 2020 e 2050, os valores encontrados variaram de 0 a 0,18, sendo que os cenários encontrados estão expostos na subsequente Figura 15.

**Figura 15.** Comparação entre o Fator CP de 2020 e 2050



Fonte: Autoria própria.

Os locais que apresentam influência direta das ações humanas no local analisado demonstraram valores mais elevados para o fator CP. A agricultura, a área urbana e a pastagem degradada foram as principais classes de Uso e Cobertura da Terra que exerceram influência direta nesse fator, tornando a área mais suscetível à erosão do solo. Esses usos do solo foram encontrados principalmente concentrados na porção central e leste da bacia hidrográfica, enquanto nas outras regiões o fator CP apresentou uma distribuição mais ampla.

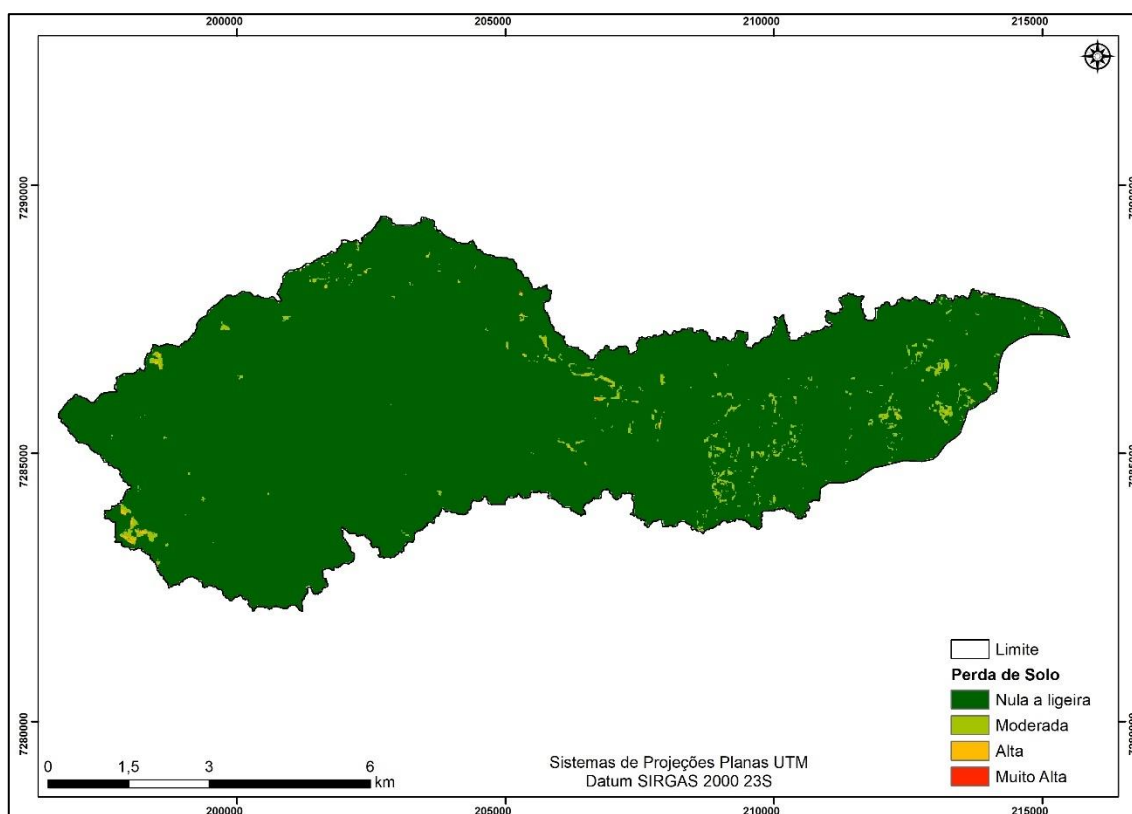
Ao comparar os dois anos, pode-se observar uma melhoria no período total avaliado, uma vez que as áreas em que o fator CP atingiu seu valor máximo diminuíram em 2050. Esse cenário é resultado da baixa influência dessas classes no panorama geral da bacia, uma vez que sua representatividade é pequena em comparação com outras classes. Isso indica que as ações realizadas na região contribuíram para reduzir o impacto dessas classes específicas no fator CP ao longo do tempo.

## 5.8. ESTIMATIVA FUTURA DE PERDA DE SOLO

Manteve-se os fatores R, K e LS, previamente obtidos, para estimar a perda de solo na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga para o ano de 2050. Os mesmos fatores foram utilizados por não apresentarem variações com o passar do tempo, uma vez que estão relacionados às características físicas de cada região, como índices pluviométricos, pedologia e declividade. Para estimar as condições futuras, considerou-se o Fator CP de 2050, pois é uma variável suscetível a alterações de acordo com o aumento ou diminuição das atividades antrópicas.

Assim, no cenário futuro, é possível representar a região com a estimativa de perda de solo e identificar as áreas mais susceptíveis a esse fenômeno, como mostrado na Figura 16.

**Figura 16.** Estimativa de Perda de Solo para 2050



Fonte: Autoria própria.

Ao avaliar as quatro classes de perda de solo, que variam de nulas a ligeiras até perdas muito altas, é possível observar que a classe mais representativa na bacia foi a de perda de solo nula a ligeira, abrangendo a maior parcela da região. Isso pode ser atribuído à presença de uma boa cobertura vegetal na área, uma vez que a classe de mata e vegetação nativa representa quase 63% da área total. Esse resultado está



em concordância com a situação atual da bacia, onde a presença de vegetação natural desempenha um papel crucial na conservação do solo.

De acordo com a Tabela 5 abaixo, nota-se que a perda de solo na bacia sempre foi em sua grande parte de nula a ligeira, já que em 2010 ela representava 96,27% e pode chegar a corresponder 98,23% das áreas no futuro.

**Tabela 5 – Percentual de Perda de Solo em 2010, 2020 e 2050.**

| Classe         | 2010      |          | 2020      |          | 2050      |          |
|----------------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|
|                | Área (ha) | Área (%) | Área (ha) | Área (%) | Área (ha) | Área (%) |
| Nula a Ligeira | 6622,82   | 96,27    | 6734,50   | 97,91    | 6724,39   | 98,23    |
| Moderada       | 215,05    | 3,13     | 120,47    | 1,75     | 104,40    | 1,53     |
| Alta           | 35,67     | 0,52     | 21,65     | 0,31     | 16,28     | 0,24     |
| Muito Alta     | 6,02      | 0,09     | 1,85      | 0,03     | 0,34      | 0,005    |

Fonte: Autoria própria.

Ao comparar as classes de perda de solo encontradas nos anos de 2010, 2020 e a estimativa para 2050, é evidente uma tendência constante de redução nas regiões que apresentam perdas moderadas, altas e muito altas. Por outro lado, as áreas que indicam perdas nulas a ligeiras experimentaram um aumento percentual durante o período considerado. A análise indica que as medidas de conservação e manejo implementadas ao longo do tempo têm demonstrado eficácia na mitigação das perdas de solo mais relevantes.

Além disso, áreas com menor risco de erosão têm sido preservadas ou apresentam um aumento na cobertura vegetal, o que contribui para a redução das perdas de solo. Esses resultados apontam para um progresso positivo na adoção de práticas sustentáveis de uso da terra e reforçam a importância da conservação ambiental para a proteção do solo.

As áreas que registraram os maiores índices de perda de solo estão relacionadas às características físicas e antrópicas da região. A porção leste e central da bacia continuou representando a maior parcela das perdas, abrangendo desde perdas moderadas até muito altas, devido ao fato de o fator K atingir seu valor máximo nessa região e também contar com a presença das áreas urbanizadas. Por outro lado, na parte oeste da bacia, é onde se encontram os valores mais elevados para os fatores LS e R, indicando as maiores declividades e níveis pluviométricos, o que acaba favorecendo a perda de solo nessa área.

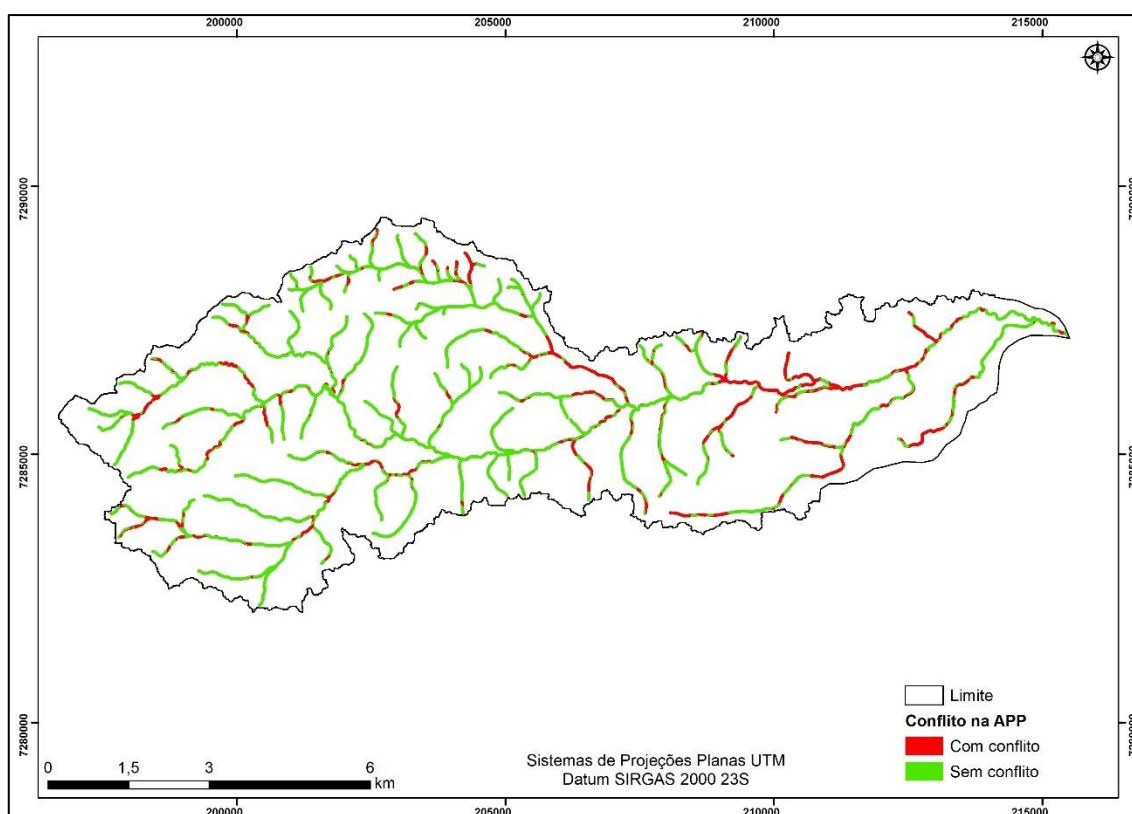
O modelo de cadeias de Markov foi empregado para determinar a perda de solo futura na bacia hidrográfica do Rio da Prata, conforme a tese elaborada por Cunha (2021). O autor conseguiu prever as mudanças percentuais de cada classe de uso do solo no período de 2050 até 2100, observando que as classes de erosão moderada, intensa e extremamente intensa sofrerão um acréscimo de 34,41% nesse período estimado. Essa previsão ressalta a necessidade de implementar incentivos para aumentar a conservação do solo e da água, por meio de políticas públicas que promovam o desenvolvimento conciliado com práticas de manejo sustentável.

Em comparação com a área de estudo em questão, as diferenças nas características geográficas, climáticas e de uso do solo podem influenciar a suscetibilidade à erosão. A bacia do Rio da Prata, por exemplo, pode apresentar uma topografia mais acidentada e solos mais vulneráveis à erosão devido à sua composição geológica e ao uso intensivo do solo para atividades agrícolas. Além disso, as práticas de manejo e conservação adotadas na bacia podem diferir das aplicadas na área de estudo, resultando em diferentes taxas de erosão. Esses fatores combinados podem explicar a disparidade nas áreas mais propensas à erosão entre as duas regiões, destacando a importância de uma abordagem contextualizada na análise da erosão do solo (CUNHA, 2021).

### 5.9. CENÁRIO DE RECUPERAÇÃO PARA O FUTURO

A Figura 17 a seguir ilustra o mapa previsto para o conflito nessas áreas no futuro. Analisando o cenário projetado, é evidente que a maior parte da Bacia Hidrográfica do Rio Carapiranga apresenta regiões sem conflito em áreas de preservação permanente (APP), em comparação com as áreas identificadas como de potencial conflito. Essa representação visual reforça a importância de estratégias proativas de preservação e restauração, direcionadas especialmente às áreas mapeadas como propensas a impactos ambientais. A compreensão desses padrões espaciais é crucial para o desenvolvimento de ações sustentáveis e medidas de conservação na região.

**Figura 17.** Mapa de Conflito nas APPs para 2050

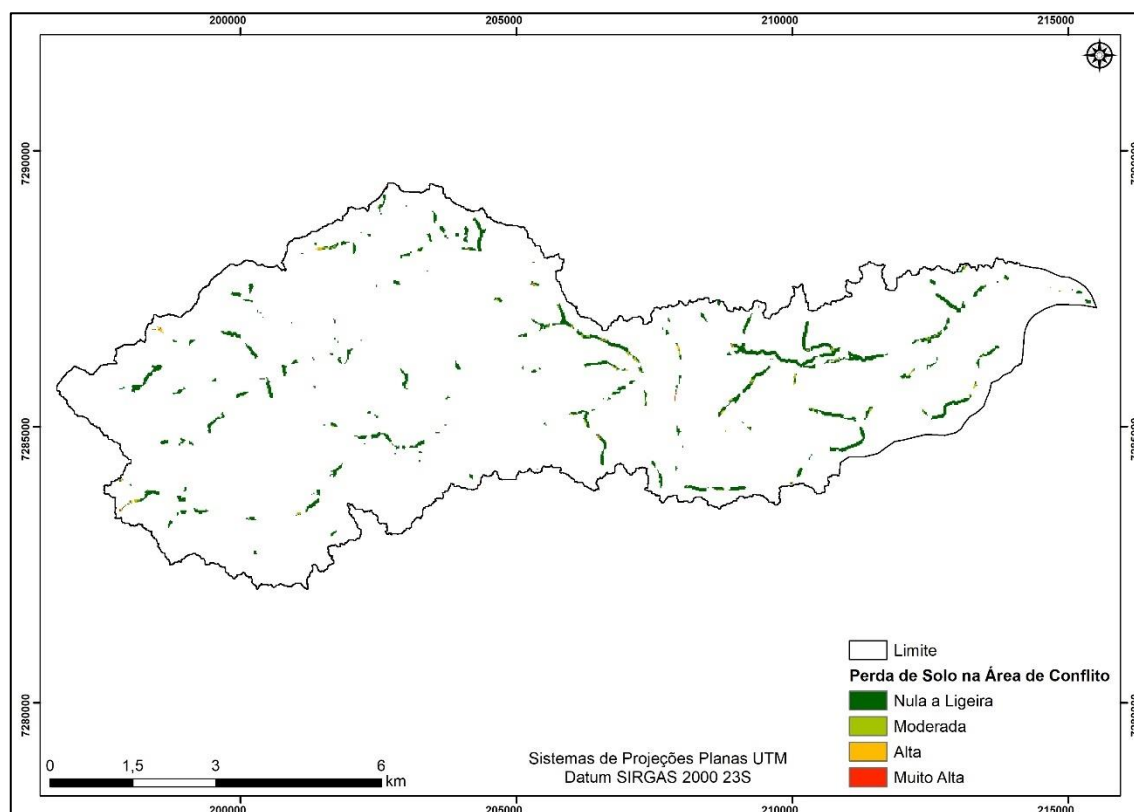


Fonte: Autoria própria.

Com o objetivo de fornecer uma visualização mais precisa das regiões prioritárias na bacia hidrográfica do Rio Carapiranga, foi elaborado o mapa apresentado na Figura 18. O mapa revela um cenário futuro bastante positivo em comparação ao encontrado para o ano de 2020. Identificaram-se perdas de solo muito altas nas partes central e oeste da bacia, contudo esses resultados indicam uma

melhoria na conservação do solo e destacam a efetividade das políticas ambientais e práticas de manejo adotadas na região.

**Figura 18.** Perda de Solo nas Áreas de Conflito para 2050



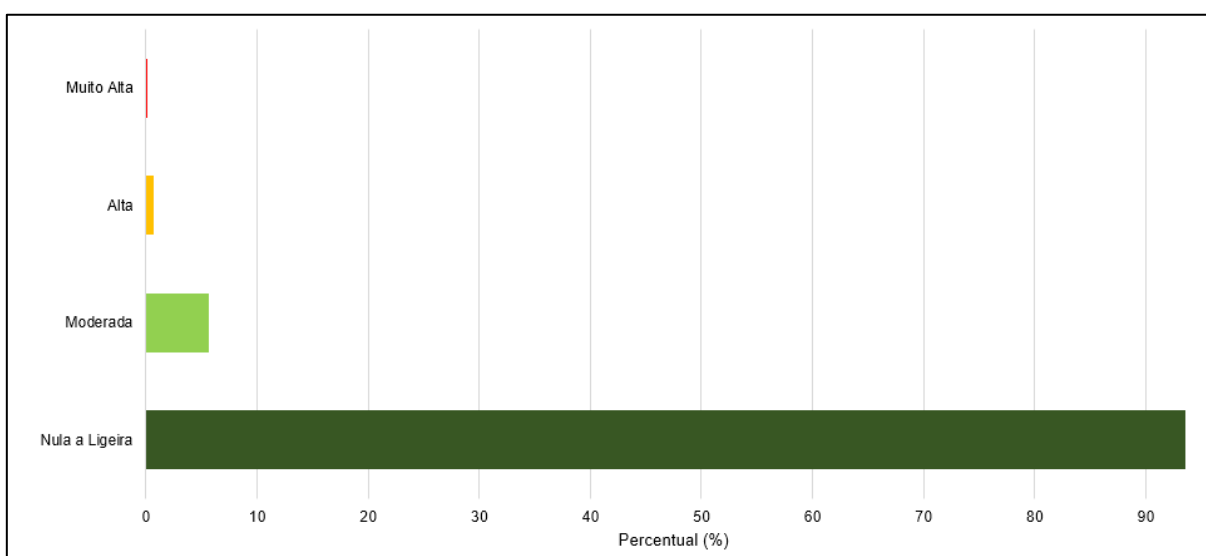
Fonte: Autoria própria.

Em uma análise comparativa entre os dados de perda de solo na bacia hidrográfica para os anos de 2020 e 2050, observamos uma notável evolução que indica melhorias significativas nas condições do solo. Em 2020, a distribuição da perda de solo revelou que 90,29% da área estudada apresentava uma perda de solo de nula a ligeira. A porcentagem mais expressiva, correspondente a 257,06 hectares, representava essa categoria. No entanto, em 2050, esse valor aumentou para 93,07%, indicando um cenário de melhoria substancial.

Ao observarmos a categoria de perda de solo moderada, houve uma redução notável de 6,73% em 2020 para 5,64% em 2050. Esta diminuição, embora modesta em termos percentuais, representa uma mudança positiva, sugerindo práticas de conservação do solo mais eficazes e medidas de manejo aprimoradas ao longo das décadas.

Em 2020, a alta perda de solo representava 2,54%, enquanto em 2050, essa porcentagem diminuiu para 0,73%. A perda de solo muito alta, que era de 0,45% em 2020, aumentou para 0,57% em 2050. Embora essa variação represente um acréscimo modesto, é importante observar que a porcentagem permanece relativamente baixa. Esse aumento pode indicar a necessidade de atenção contínua e aprimoramento das práticas de conservação do solo para mitigar qualquer tendência ascendente nessa categoria específica. Apesar do leve aumento, os esforços de gestão do solo ao longo das décadas vão ter contribuído positivamente para a redução geral das perdas significativas de solo na bacia hidrográfica.

**Figura 19.** Gráfico do Percentual de Perda de Solo na Área de Conflito para 2050



Fonte: Autoria própria.

Em resumo, os resultados sugerem que a bacia hidrográfica apresentaria melhorias em suas condições de solo entre 2020 e 2050, com um aumento promissor na área de solo classificada como nula a ligeira e reduções notáveis nas categorias de perda de solo moderada e alta. Essa evolução positiva apenas pode ser possível com um compromisso efetivo com a gestão sustentável do solo e o sucesso das práticas de conservação implementadas ao longo do período analisado.

Diante da crescente preocupação com os desafios hídricos resultantes da baixa disponibilidade de água em certas regiões do Estado de São Paulo, aliada à evidente desigualdade no consumo e distribuição, é crucial examinar a conexão desses problemas com práticas de desmatamento e ocupação de áreas de mananciais. Além

disso, é fundamental abordar o pouco investimento na mitigação das perdas de água sofridas nas redes de distribuição, destacando a necessidade de enfatizar as políticas públicas de preservação, dando enfoque na relevância das áreas de preservação permanente para a integridade dos cursos d'água (JACOBI *et al.*, 2021).

Atualmente, segmentos do Rio Carapiranga, situados próximos do município de Registro (SP), evidenciam uma notável ausência de vegetação natural ao longo de sua extensão, como pode ser observada na Figura 20. Dado que suas margens são majoritariamente compostas por Organossolos háplicos, solos superficiais com limitada capacidade de infiltração, tornam-se mais propensas a processos erosivos (RIBEIRO, 2021).

**Figura 20.** Falta de vegetação nativa nas margens do Rio Carapiranga



Fonte: Google Earth Pro (2023).

Na atual observação da região, é possível constatar o desenvolvimento de bancos de areia, um fenômeno ocasionado pelo processo gradual de assoreamento, conforme a Figura 21. Este último, por sua vez, é decorrente da deposição de partículas sedimentares ao longo do leito fluvial, constituindo uma clara e imediata ramificação da atividade erosiva intensificada. O uso inadequado de áreas que, por princípio, deveriam ser mantidas em seu estado natural contribui para a agravante do problema (RIBEIRO, 2021).



**Figura 21.** Erosão de solo presente próxima do Rio Carapiranga

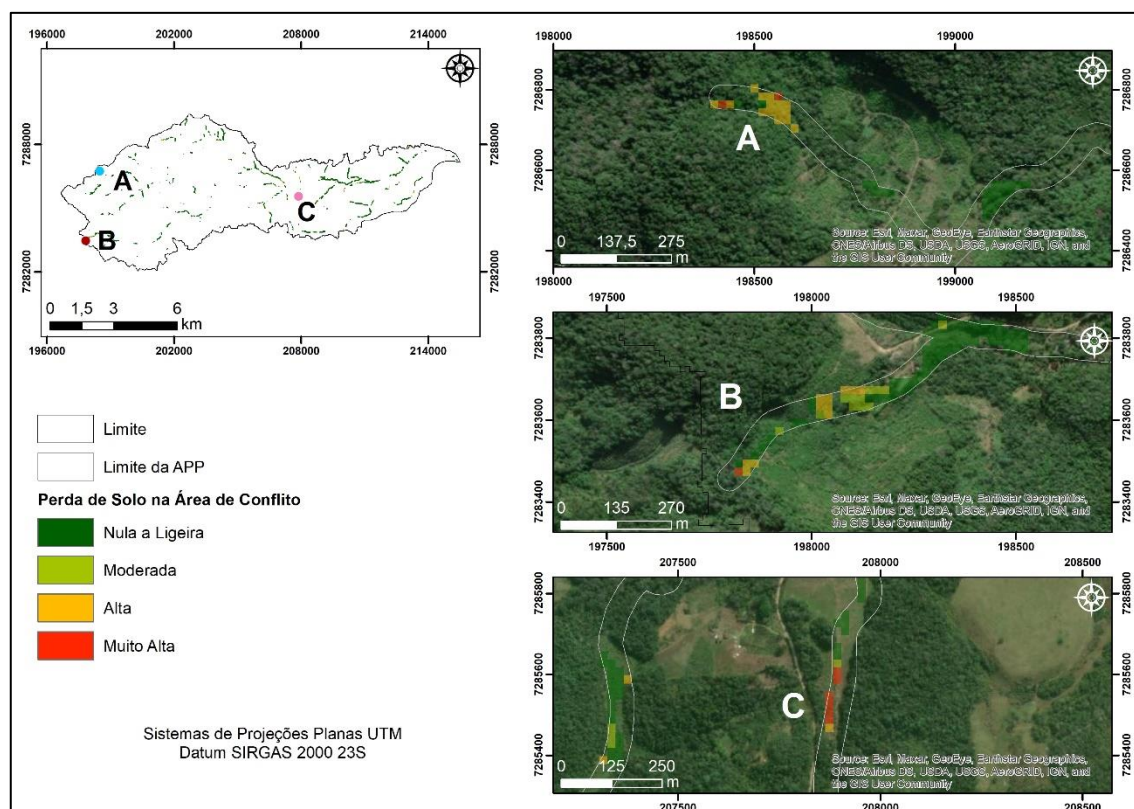


Fonte: Google Earth Pro (2023).

Esse cenário de formação de bancos de areia emerge como um alerta visual para a deterioração ambiental decorrente do assoreamento. A deposição de partículas no fundo do rio não apenas compromete a fluidez das águas, mas também enfatiza a vulnerabilidade do ecossistema fluvial. O aumento da atividade erosiva, especialmente induzida pelo uso impróprio de áreas destinadas à preservação, intensifica o desafio de manter a integridade ambiental. Assim, a necessidade de práticas de conservação mais eficazes e de uma gestão ambiental sustentável torna-se ainda mais premente diante desse quadro complexo (RIBEIRO, 2021).

Nesse sentido, por meio da estimativa das áreas com perda de solo muito alta previstas para o ano de 2050, três áreas foram selecionadas para evidenciar o problema enfrentado pelo desmatamento das áreas de preservação, sendo possível visualizar através da Figura 22 abaixo. Através dessas regiões que apresentam maior vulnerabilidade e susceptibilidade para a erosão de solo, é imprescindível traçar planos visando a recuperação ambiental e conservação da mata nativa no momento presente, para que no futuro esse cenário possa apresentar uma melhoria na preservação dos recursos hídricos da bacia.

**Figura 22.** Análise das áreas prioritárias de recuperação para 2050



Fonte: Autoria própria.

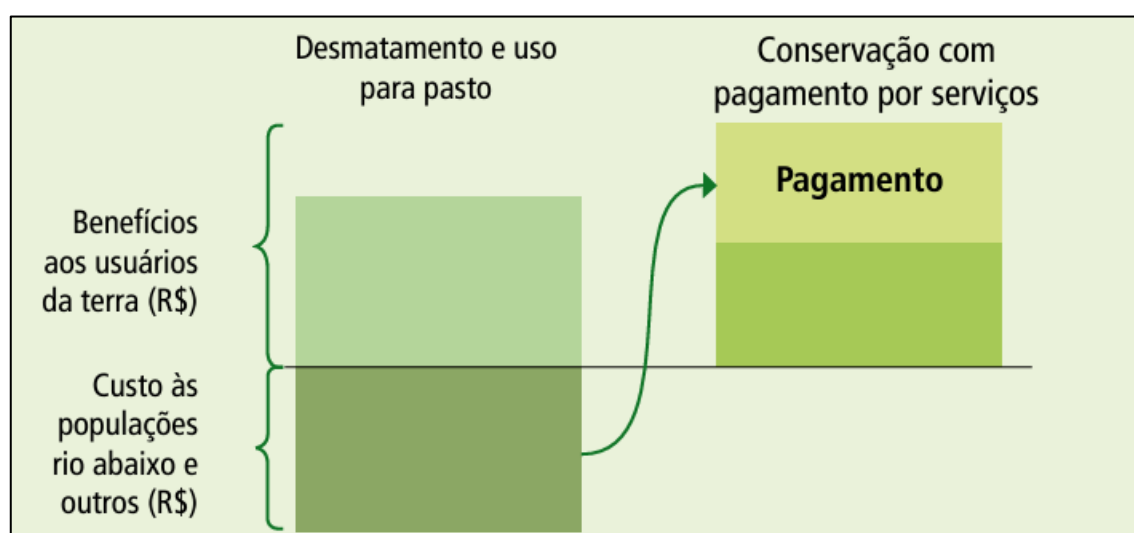
Entre os lugares avaliados, em destaque a região C do mapa presente na Figura 22, por ser próxima da zona urbana do município de Registro (SP), uma medida que poderá contribuir com os moradores e agricultores presentes no local seria o Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

A Figura 23 demonstra como funciona o PSA de forma ilustrativa. Para efeitos exemplificativos, demonstra-se uma situação na qual os detentores são confrontados com a decisão entre preservar uma floresta natural de maneira sustentável e desflorestá-la para utilizar a área como pastagem. O dilema reside no fato de que os ganhos obtidos pelos detentores ao conservar a floresta muitas vezes são significativamente inferiores aos que obteriam ao direcioná-la para outro propósito. Como os detentores de terras raramente são recompensados por serviços ambientais, como conservação da biodiversidade, sequestro de carbono, ou regulação dos fluxos hidrológicos que refletem na maior disponibilidade de água aos moradores na jusante da bacia hidrográfica, a conversão da floresta para outro fim acaba se tornando mais lucrativa na perspectiva do dono da terra e sem o incentivo financeiro necessário, se



torna difícil obrigar a população a considerar o uso da terra de forma sustentável. O mecanismo do PSA opera ao alocar uma parcela dos benefícios resultantes da conservação da floresta dos usuários a jusante para os detentores a montante, tornando a prática de preservação mais atrativa. O montante pago deve claramente exceder o benefício adicional que os detentores obteriam ao utilizar a terra de maneira alternativa (se não, não seria possível observar a mudança no comportamento), mas deve ser inferior ao valor percebido pelos usuários do serviço (pois, do contrário, não iriam se disponibilizar pelo pagamento dessa ação) (Pagiola *et al.*, 2013).

**Figura 23.** Funcionamento do PSA



Fonte: Pagiola *et al.* (2013).

Diante do exposto, esses pagamentos podem ser tidos como estímulos econômicos em contraposição aos métodos regulatórios tradicionais, ao promover a participação ativa tanto dos proprietários, que devem ceder porções dos seus terrenos para a finalidade, quanto dos consumidores dos serviços de atividades de preservação dos ecossistemas naturais (RIBEIRO, 2021).

Essa abordagem se justifica pelo fato de que o processo de planejamento e implementação de práticas de conservação demandam tempo e dinheiro por parte dos produtores agrícolas e donos de terras. Portanto, o PSA surge como uma alternativa viável quando o benefício adicional para conservar a área é maior que os custos necessários. Dessa forma, as regulamentações e controles das Áreas de Preservação Permanente (APPs) podem ser aceitas com maior facilidade ao complementarem políticas públicas capazes de propor fontes de renda mais variadas para os produtores

dos serviços ambientais, por terem disponível um benefício financeiro ao se preservar áreas em suas propriedades de terra (RIBEIRO, 2021).

A educação ambiental também é uma ferramenta aliada às práticas conservacionistas, já que no contexto da conscientização ambiental, é crucial ressaltar a importância de abordar as Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Reservas Legais (RLs) com todas as pessoas, promovendo a mudança de atitudes e percepções relacionados ao meio ambiente. Apesar de existirem desafios ao se tentar integrar uma proposta que traga ideias críticas, inovadoras, podendo trazer transformações políticas sociais, a abordagem desse tema deve ser holística, relacionando o homem com o a natureza, dentro do universo que se encontra, já que os recursos são finitos e o homem é um dos principais causadores da degradação ambiental. Conforme destacado por Souza *et al.* (2011), em zonas rurais, a educação ambiental auxilia no incentivo das práticas mais sustentáveis voltadas para preservação dos recursos e a consecutiva alteração dos meios de produção rudimentares atuais (STRECK; ESSI, 2013).

Devido à população majoritária do Vale do Ribeira ser composta por comunidades ribeirinhas, como quilombolas, indígenas e caiçaras, torna-se necessário destacar a interação dessas comunidades com as propostas de conservação mencionadas anteriormente. As terras que antes pertenciam aos povos tradicionais da região, hoje em sua grande parte são Unidades de Conservação ou Estações Ecológicas, dessa forma, antes sua fonte base de sobrevivência eram atividades extrativistas florestais e de roça, com uma alimentação complementada com caças e pesca, e agora são consideradas atividades ilegais dentro das unidades conservacionistas. Para promoção de um futuro visando um desenvolvimento sustentável adequado para as próximas gerações, é essencial considerar a velocidade de recuperação da natureza durante a exploração dos recursos naturais, trazendo um manejo e exploração mais adequado (FONSECA; PRADO, 2008; RIBEIRO, 2021).

## 6. CONCLUSÕES

A análise da bacia hidrográfica do Rio Carapiranga indicou melhorias para a gestão da perda de solo projetada para o ano de 2050, demonstrando a um cenário positivo das práticas conservacionistas locais. O estudo permitiu a identificação de áreas com diferentes níveis de perda de solo por meio do Modelo de Previsão Futura das Cadeias Markov, contribuindo para a compreensão dos fatores que influenciam os processos erosivos.

A hierarquização das Áreas de Preservação Permanente (APPs), considerando a importância das matas ciliares na prevenção da erosão, possibilitou priorizar a recuperação de áreas com perda de solo de alta a muito alta intensidade. A ausência de vegetação nativa, evidenciada nas áreas degradadas, impacta negativamente o meio ambiente, contribuindo para o assoreamento dos rios e a redução do leito, afetando a biota aquática.

A utilização de técnicas avançadas de processamento de dados foi essencial para identificar fragmentos críticos, permitindo não apenas a localização precisa dessas áreas, mas também a elaboração de planos de ação específicos para cada cenário identificado.

Diante dessa problemática, a integração do diagnóstico obtido nas tomadas de decisão e no planejamento dos órgãos responsáveis, seja no plano de manejo da bacia hidrográfica ou em áreas voltadas para a proteção ambiental, sinaliza a necessidade da continuidade das unidades de conservação na região. Essa abordagem indica um caminho para obtenção de fiscalizações mais eficazes, visando reduzir o impacto ambiental causado pela erosão.

Para dar continuidade às boas práticas conservacionistas, sugere-se a implementação do Pagamento por Serviço Ambiental (PSA) como estímulo econômico, a intensificação da educação ambiental para promover conscientização e mudança de atitude, e a elaboração de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas, visando impedir a deterioração contínua e promover a recuperação das áreas de preservação permanente desmatadas. Essas estratégias convergem para uma gestão sustentável da bacia hidrográfica, com foco na preservação dos recursos naturais e na promoção do equilíbrio ambiental.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, D. N. O.; OLIVEIRA, L. M. M.; CANDEIAS, A. L. B.; BEZERRA, U. A.; LEITE, A. C. S. Uso e cobertura do solo utilizando geoprocessamento em municípios do agreste de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 4, n. 1, p. 58-68, 2018. Disponível em: <https://www.openjournalsystemsbrasil.org/rbma>. Acesso em: 07 ago. 2024. ISSN: 2595-4431.

ALMEIDA, L. C. F. *et al.* Seriam as questões ambientais entraves ao desenvolvimento do Vale do Ribeira? *Cadernos CERU*, V. 28, n. 2, dez. 2016.

ALVARES, S. M. R. **Limites e potencialidades da transição agroecológica com sistemas agroflorestais no Vale do Ribeira – SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2018. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7428-2376>.

ALVES SOBRINHO, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; AYRES, F. M. Delimitação automática de bacias hidrográficas utilizando dados SRTM. *Engenharia Agrícola*, v.30, n. 1, p. 46–57, 2010.

ARANTES, P. B. *et al.* Agroflorestas familiares no Vale do Ribeira; diagnóstico produtivo, estratégias e desafios. *Revista Espaço de Diálogo e Desconexão – REDD*, Araraquara, v.9, n.1 e 2, 2017. DOI: <https://doi.org/10.32760/1984-1736/REDD/2017.v9i1.10950>.

BARRETTO, A. G. DE O. P.; LINO, J. S.; SPAROVEK, G. Bibliometria da pesquisa brasileira em erosão acelerada do solo: instituições, temas, espaço e cronologia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 6, p. 1845–1854, 2009.

BATISTA, R. A. W.; NERY, L. M.; MATUS, G. N.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Estimativa do fator de erosividade do solo na região do Vale do Ribeira Paulista, Brasil. *Formação (Online)*, v. 28, n. 53, p. 441-460, 2021.

BRASIL. Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. Altera os arts. 10, 40, 14, 16 e 44, e acresce dispositivos à Lei no 4.771, de 15 de setembro de 1965, que institui o Código Florestal, bem como altera o Art. 10 da Lei no 9.393, de 19 de dezembro de 1996, que dispõe sobre o Imposto sobre a Propriedade Territorial Rural - ITR, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 25 ago. 2001.

BORGES, M. P. **Análise da alteração do escoamento superficial pela tendência de evolução do uso e ocupação do solo usando cadeia de markov e análise espacial para bacia do córrego de São Pedro, Uberlândia/MG**. UBERLÂNDIA, MG. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3617>. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/29213/4/AnaliseAlteracaoEscoamento.pdf>. Acesso em: 26 out. 2022.

BORGES, K. M. R. **Avaliação da Susceptibilidade Erosiva da Bacia do Rio Carinhonha (MG/BA) por Meio da EUPS: Equação Universal de Perda de Solos**. Dissertação (mestrado), Universidade de Brasília - UNB, 2009.

CAMPAGNOLO, K. *et al.* Área de preservação permanente de um rio e análise da legislação de proteção da vegetação nativa. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, p. 831–842, 2017.

CARVALHO, A. T. F. Bacia hidrográfica como unidade de planejamento: discussão sobre os impactos da produção social na gestão de recursos hídricos no Brasil. **Caderno Prudentino de Geografia**, v. 1, n. 42, p. 140–161, 2020.

CASTRO, S. L. I.; MAY, L. R.; GARCIAS, C. M.. Meio ambiente e cidades - Áreas de Preservação Permanente (APPs) marginais urbanas na Lei Federal n. 12.651/12. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 3, p. 1340–1349, 2018.

COLIADO, P. H. S.; NERY, L. M.; SIMONETTI, V. C.; SILVA, D. C. C. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Carapiranga em registro (SP), brasil, por meio de técnicas de geoprocessamento. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**. Investigación, desarrollo y práctica, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 981–1000, 2022. DOI: 10.22201/iingen.0718378xe.2022.15.2.80073. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/80073>. Acesso em: 7 jan. 2023.

CORDEIRO, G; AMORIM, M.; RONQUIM, C. **Mudança de uso e ocupação da terra no município de Registro, SP, entre os anos de 1987 e 2017**. CIIC. 2017;1-10.

COSTA, C. R. **Plano de gestão e controlo da Acacia Longifolia em áreas classificadas: análise e proposta para o monumento natural local do Alcantilado de Montedor**. Dissertação (Mestrado em Gestão Ambiental e Ordenamento do Território), Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, Refóios do Lima, 2019. Disponível em: <http://repositorio.ipvc.pt/handle/20.500.11960/2183>. Acesso em: 04 abr. 2023.

COSTA, H. F. **Análise temporal da fragilidade ambiental na bacia hidrográfica do Rio Sorocabaçu, Ibiúna, SP**. 2020. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, UNESP – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2020.

COSTA, A. F.; FERRAZ, R. S.; LIMA, L. L. Efeitos da erosividade da chuva e da cobertura do solo na perda de solo em áreas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, e20170341, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcsol/article/view/20170341>. Acesso em: 07 ago. 2024.

CUNHA, E. R. **Predições do uso e cobertura da terra e seus impactos na erosão do solo no ecótono cerrado/mata atlântica: estudo de caso da Bacia Hidrográfica do Rio da Prata**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/24083>. Acesso em: 19 abr. 2023.

DAMAME, D. B.; LONGO, R. M.; OLIVEIRA, E. D. Impactos ambientais pelo uso e ocupação do solo em sub bacias hidrográficas de Campinas, São Paulo, Brasil. **Acta Brasiliensis**, Campina Grande, v. 3, n. 1, p. 1–7, 2019.

FONSECA, G.; PRADO, D. M. Discussão sobre o conceito de meio ambiente natural, antrópico e de mosaico e sua apropriação didática no ensino de ecologia e educação ambiental no Baixo Vale do Ribeira/SP. **Revista Didática Sistemica**, v. 8, p. 1–15, jul./dez. 2008. ISSN: 1809-3108.

GOMES, F. E. F.; MAMEDE, G. L.; LOPES, F. B. Alternativa Para o Cálculo Automático e Especializado do Fator Topográfico da USLE em Bacias Hidrográficas. **Irriga**, v. 1, n. 2, p. 6–13, 2018. DOI: 10.15809/irriga.2018v1n2p6-13. Disponível em: <https://actaarborea.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3592>. Acesso em: 7 abr. 2023.

KUMAR, A.; DEVI, M.; DESHMUKH, B. Integrated remote sensing and geographic information system based rusle modelling for estimation of soil loss in Western Himalaya, India. **Water resources management**, v. 28, n. 10, p. 3307–3317, 2014.

LUIZ, C. H. P. **Modelagem da cobertura da terra e análise da influência do reflorestamento na transformação da paisagem: Bacia Do Rio Piracicaba e Região Metropolitana do Vale do Aço**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 141 p., 2014.

LIMA, V. N.; GOMES, S. O.; CANDEIAS, A. L. B.; SILVA, R. R. MapBiomass e uso e cobertura dos solos do Município de Brejinho, Pernambuco. **CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA; EXPOSICARTA**, 27., 26., 2017, Rio de Janeiro. Anais do XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia e XXVI Expositocarta. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2017. p. 947-951.

MACHADO, T. C. E. *et al.* Avaliação do uso e ocupação das áreas de preservação permanente nos anos de 2008 e 2013 na Zona Urbana de Humaitá, Amazonas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações, v. 15, n. 2, p. 744–750, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.5892/ruvrd.v15i2.3017>. Acesso em: 17 jan. 2023.

MAGALHÃES FILHO, F. J. C.; AYRES, F. M.; SOBRINHO, T. A. Integrando SIG e USLE para mapeamento da perda de solo em área de proteção ambiental. **Revista Agrarian**, v. 7, n. 26, p. 552–559, 2014.

MOURA, M. M.; FONTES, C. S.; SANTOS, M. H.; ARAUJO FILHO, R. N.; HOLANDA, F. S. R. Estimativa de perda de solo no baixo São Francisco Sergipano. **Scientia Agraria**, v. 18, n. 2, p. 126–135, 2017.

NACHTIGALL, S. D. **Geoprocessamento aplicado à estimativa de perda de solo por erosão hídrica na Bacia Hidrográfica do Arroio Fragata**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018. Disponível em: <http://guaiaca.ufpel.edu.br:8080/handle/prefix/4942>. Acesso em: 15 jan. 2023.

NUNES, J. G.; CAMPOS, M. C. C.; NUNES, J. C.; MANTOVANELLI, B. C.; CUNHA, J.M.; SOARES, M. D. R. Aplicação da equação universal de perdas de solo na região sul do Amazonas. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v. 15, n. 2, p. 548–557, 2017.

OLIVEIRA, E. A.; SILVA, A. A.; SILVA, M. G. Avaliação da perda de solo em áreas agrícolas utilizando a Equação Universal de Perda de Solo (USLE). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 6, p. 445-451, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/article/view/2020.097>. Acesso em: 13 ago. 2024.

PAGIOLA, S.; GLEHN, H. C. V.; TAFFARELLO, D. **Experiências de pagamentos por serviços ambientais no Brasil**. São Paulo: SMA/CBRN, 2013.

PREIS, C. M.; FRANCO, D.; VARELA, S. C. Avaliação do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Itajaí e simulação para 2027. **Revista Geociências**, v. 40, n. 2, p. 407-414, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i02.14321>.

RIBEIRO, R. F. **ANÁLISE DAS TRANSFORMAÇÕES socioeconômicas e ambientais no município de Registro (SP) por meio de ferramentas de geoprocessamento entre os anos de 2002 a 2020**. Tese (Trabalho de Conclusão de Curso em Bacharelado de Antropologia), Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2021. Disponível em: <http://dspace.unila.edu.br/123456789/6375>. Acesso em: 17 nov. 2023.

ROSSI, R. A.; SANTOS, E. Conflito e regulação das águas no Brasil – a experiência do Salitre. **Caderno CRH**, v. 31, n. Cad. CRH, 2018 31(82), p. 151-167. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-49792018000100010>. Acesso: 17 jan. 2023.

SANTOS, K. E. L. *et al.* Geoestatística e geoprocessamento na tomada de decisão do uso de insumos em uma pastagem. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 11, n. 3, p. 294-307, 2017. Disponível em: <BrazJBiosystemsEngv11n3p2943072017.pdf> (embrapa.br). Acesso em: 14 jan. 2023.

SCARPINELLA, G. D.; MIRANDA, R. B.; MAUAD, F. F. Estimativa da erosão em carreadores de cana-de-açúcar através da equação universal de perdas de solo. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 5, p. 959-963, 2019.

SILVA, A. M. **Análise de múltiplos cenários futuros climáticos e de uso e cobertura da terra na estimativa de vazões na bacia do Rio Salgado, semiárido nordestino**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

SILVA, F. L.; FUSHITA, A. T.; CUNHA-SANTINO, M. B.; BIANCHINI JR, I.; VENEZIANI JR, J. C. T. Gestão de recursos hídricos e manejo de Bacias Hidrográficas No Brasil: elementos básicos, histórico e estratégias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1626-1653, 2021.

SILVA, J. J. I.; CANEPARO, S. C. Análise das variações espaciais no município de pontal do Paraná (Paraná – Brasil), entre os anos de 1980 e 2032 decorrentes da instalação do complexo portuário. **Revista Cerrados**, v. 15, n. 02, p. 263-290, 2017. DOI: <https://doi.org/10.22238/rc24482692v15n22017p263a290>.

SILVA, M. C. Sistemas de informações geográficas na identificação de doenças e epidemias. **Tekhne e Logos**, v. 8, n. 4, p. 94-106, 2017.

SIQUEIRA, H. E. **Identificação de áreas para conservação do solo e da água na área de proteção ambiental do Rio Uberaba com geoprocessamento**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2019. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/191086>. Acesso em: 12 jan. 2023.

SOUZA, A. R. *et al.* Zoneamentos da vulnerabilidade ambiental e expectativa de perda de solo: é possível usar a USLE na determinação de vulnerabilidade ambiental? **Revista Geociências**, v. 38, n. 4, p. 1105–1119, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i4.14083>.

SOUZA, J. C. M.; GONÇALVES, L.; SOARES, A. M. D. A educação ambiental na recuperação e conservação de recursos naturais: a percepção de assentados rurais no Cerrado Goiano. **Revista de Geografia Agrária**, v. 6, n. 11, p. 312 - 337, 2011.  
STRECK, M. T.; ESSI, L. ÁREAS DE PRESERVAÇÃO PERMANENTE E RESERVA LEGAL: EXPERIÊNCIA EM EDUCAÇÃO AMBIENTAL ENVOLVENDO FAMÍLIAS DE PRODUTORES RURAIS. **REGET**, v. 14, n. 14., 2013, p. 2832-2838.

TAGLIARINI, F. S. N. **Técnicas de geoprocessamento aplicadas na quantificação de perdas de solo em Bacia Hidrográfica**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), UNESP - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/150268>. Acesso em: 14 jan. 2023.

XAVIER, A. P.; SILVA, R. M. Modelagem temporal dinâmica do uso e ocupação do solo baseado em SIG para a Bacia do Rio Tapacurá (PE). **Revista Geociências**, v. 37, n. 1, p. 193–210, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v37i1.12623>.  
ZAIDAN, R. T. Geoprocessamento Conceitos e Definições. **Revista de Geografia - PPGeo - UFJF**, v. 7, n. 2, p. 195–201, 2017.