



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UNB PLANALTINA
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL
EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

A NUMERAÇÃO DAS PÁGINAS DEVE APARECER A PARTIR DA INTRODUÇÃO!

**IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO E
CONSERVAÇÃO DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE MANANCIAIS NA BACIA DO
PIPIRIPAU NO DISTRITO FEDERAL**

Ilana Sarah dos Santos Oliveira

Brasília, DF
2025



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE UnB PLANALTINA
MESTRADO PROFISSIONAL EM REDE NACIONAL
EM GESTÃO E REGULAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS**

ILANA SARAH DOS SANTOS OLIVEIRA

**IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO E CONSERVAÇÃO
DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE MANANCIAS NA BACIA DO PIPIRIPAU NO
DISTRITO FEDERAL**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, Faculdade UnB Planaltina, como requisito para obtenção do grau de mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Área de concentração: Instrumentos da política de recursos hídricos.

Linha de pesquisa: Metodologias para implementação dos instrumentos de gestão de recursos hídricos.

Orientadora: Prof. Dra. Maria Cristina de Oliveira

Brasília, DF
2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus pela saúde, força e oportunidades que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Ana Rosolinda e Sebastião de Oliveira, pelo apoio incondicional e pelos valores que me transmitiram ao longo da vida. À minha avó, Teófila, por seu incentivo e auxílio nos estudos, contribuindo significativamente para minha formação.

Agradeço à Professora Maria Cristina, minha orientadora, pelo direcionamento e suporte durante esta pesquisa. Seu acompanhamento foi essencial para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todos os professores e colegas do Prof^Água pelo apoio e pelas contribuições ao longo da minha trajetória acadêmica.

Meu agradecimento também a Erick Kill, pelo auxílio técnico e contribuições durante a execução do estudo.

Por fim, expresso minha gratidão à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento deste estudo (Código de Financiamento 001), bem como ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos – Prof^Água, no âmbito do Projeto CAPES/ANA AUXPE N° 2717/2015, pelo suporte técnico-científico fornecido.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, meu sincero agradecimento.

RESUMO

A Bacia do Ribeirão Pipiripau, localizada no Distrito Federal, desempenha um papel fundamental no abastecimento hídrico da região, atendendo a uma população significativa e servindo como área produtora de alimentos. No entanto, a intensificação das atividades agrícolas e a crescente expansão urbana vêm comprometendo a capacidade de infiltração do solo, reduzindo a recarga dos aquíferos e aumentando o escoamento superficial. Este estudo tem como objetivo analisar os impactos do uso e ocupação do solo na gestão e conservação das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) dentro da bacia, com ênfase na relação entre impermeabilização, erosão, potencial de infiltração e disponibilidade hídrica. A metodologia adotada incluiu a classificação supervisionada de imagens do satélite Sentinel-2 por meio do algoritmo Gradient Boosting, aplicado no Google Earth Engine, além da análise espacial de variáveis ambientais no software QGIS, considerando aspectos geomorfológicos e pedológicos. Os resultados indicam uma significativa redução da vegetação nativa nas últimas décadas, acompanhada pelo aumento de áreas urbanizadas e agrícolas, que pode gerar impactos diretos na capacidade de infiltração do solo. O mapeamento do potencial de recarga revelou que as áreas mais críticas coincidem com regiões de intensa atividade agropecuária e alguns pontos de ocupação urbana, onde a compactação do solo e o uso inadequado do manejo hídrico comprometem a manutenção dos recursos hídricos. Como conclusão, reforça-se a necessidade da implementação de estratégias de gestão territorial que integrem infraestrutura verde, técnicas de conservação do solo e políticas públicas voltadas à proteção das APMs. Medidas como a ampliação de áreas de recarga, a recuperação de vegetação ripária e o incentivo ao uso de práticas agrícolas sustentáveis são essenciais para mitigar os impactos da ocupação e garantir a resiliência hídrica da bacia no longo prazo.

Palavras-chave: Gestão hídrica; Uso e ocupação do solo; Recarga de aquíferos; Bacia do Pipiripau; Conservação ambiental.

ABSTRACT

The Ribeirão Pibiripau Basin, located in the Federal District, plays a fundamental role in the region's water supply, serving a significant population and functioning as a key food production area. However, the intensification of agricultural activities and the ongoing urban expansion have been compromising the soil infiltration capacity, reducing aquifer recharge, and increasing surface runoff. This study aims to analyze the impacts of land use and land cover on the management and conservation of Water Source Protection Areas (APMs) within the basin, with an emphasis on the relationship between impermeabilization, erosion, infiltration potential, and water availability. The methodology adopted included the supervised classification of Sentinel-2 satellite images using the Gradient Boosting algorithm applied in Google Earth Engine, as well as spatial analysis of environmental variables in QGIS software, considering geomorphological and pedological aspects. The results indicate a significant reduction in native vegetation over the past decades, accompanied by an increase in urbanized and agricultural areas, which may directly impact the soil infiltration capacity. The recharge potential mapping revealed that the most critical areas coincide with regions of intense agricultural activity and certain points of urban occupation, where soil compaction and inadequate water management practices compromise the maintenance of water resources. As a conclusion, the study reinforces the need for implementing territorial management strategies that integrate green infrastructure, soil conservation techniques, and public policies aimed at protecting APMs. Measures such as expanding recharge areas, restoring riparian vegetation, and promoting the use of sustainable agricultural practices are essential to mitigate the impacts of land use and ensure the long-term hydrological resilience of the basin.

Keywords: Water management; Land use and land cover; Aquifer recharge; Pibiripau basin; Environmental conservation.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

SI27ii Santos Oliveira , Ilana Sarah
IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO E
CONSERVAÇÃO DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE MANANCIAIS NA BACIA DO
PIPIRIPAU NO DISTRITO FEDERAL / Ilana Sarah Santos Oliveira
; orientador Maria Cristina Oliveira. -- Brasília, 2025.
60 p.

Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em
Gestão e Regulação de Recursos Hídricos) -- Universidade de
Brasília, 2025.

1. Metodologias para implementação dos instrumentos de
gestão de recursos hídricos.. 2. Instrumentos da política de
recursos hídricos. . 3. Uso e Ocupação Solos Bacia
Hidrográfica . 4. Bacia Pípiripau . 5. Potencial de
Infiltração . I. Oliveira, Maria Cristina , orient. II.
Título.

ILANA SARAH DOS SANTOS OLIVEIRA

**IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO E CONSERVAÇÃO
DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE MANANCIAS NA BACIA DO PIPIRIPAU NO
DISTRITO FEDERAL**

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos da Universidade de Brasília, Faculdade UnB Planaltina, como requisito para obtenção do grau de mestre em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos.

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Maria Cristina de Oliveira (UnB /FUP/ Prof^Água)

Presidente

Prof.^a Dr.^a Lucijane Monteiro de Abreu, (UnB /FUP/ Prof^Água)

Examinadora Interna

Dr. Denilson Pereira Passo, Serviço Florestal Brasileiro

Examinador Externo à Instituição

Prof.^o Dr. Antônio Almeida Nobre Júnior (UnB/FUP/ Prof^Água)

Suplente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1	Impacto do uso e cobertura dos solos na gestão hídrica	15
2.2	Potencial de Infiltração em Função do Uso, Cobertura e Tipo de Solo.....	18
2.3	Produção de sedimentos em Bacias Hidrográficas.....	19
2.4	Enquadramento legal e uso sustentável das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) no Distrito Federal.....	21
2.5	Crise hídrica no Distrito Federal	24
2.6	Bacia hidrográfica do ribeirão Pípiripau no Distrito Federal.....	26
3	MATERIAL E MÉTODO	31
3.1	Caracterização da área de estudo	31
3.2	Obtenção de dados.....	33
3.2.2	Aplicação do Gradient Boosting na classificação de uso e ocupação do solo.....	36
3.2.3	Imagens de satélite.....	36
3.2.4	Mapeamento e Potencial de Infiltração	37
3.2.5	Classificação do potencial de recarga	41
3.3	Análise estatística.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
4.1	Fragmentação de habitats.....	44
4.2	Desempenho Modelo de Classificação	48
4.3	Mapa de potencial de infiltração na bacia do Ribeirão Pípiripau	50
4.4	Impacto do uso e ocupação do solo APM Pípiripau-DF	53
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	55
	REFERÊNCIAS	58
	ANEXO.....	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)	23
Figura 2. Delimitação da Unidade Hidrográfica do Rio Pípiripau no Distrito Federal e localização das estações de monitoramento hidrológico. Fonte: Autora (2024).....	28
Figura 3. Série temporal de vazões médias anuais na estação Pípiripau Frinocap DF-30 e a linha de tendência de dados. Fonte: https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/Relatorios/#/ 29	29
Figura 4. Dados Pluviométricos anuais- Estação CAESB Taquara. Fonte: https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/Relatorios/#/	30
Figura 5. Localização da área de estudo na Bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)	31
Figura 6. Área da APM Pípiripau (delimitada em amarelo) no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)	33
Figura 7. Fluxograma esquemático da classificação do uso e cobertura do solo. Fonte: Autora (2024)	34
Figura 8. Mapa da geomorfologia da bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal. Fonte: Embrapa.....	40
Figura 9. Mapa de solos da bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal. Fonte: Embrapa	41
Figura 10. Mapa do uso solo da bacia do Pípiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)	44
Figura 11. Mapa Localização Estação Ecológica Águas Emendadas. Fonte: Autora (2024) ..	46
Figura 12. Matriz de confusão para amostras de classificação de solos.....	49
Figura 13. Mapa do potencial de recarga da bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)	51
Figura 14. Mapa do potencial de recarga da bacia do Pípiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)	51

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Referência da classificação do uso do solo.	35
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Potencial de recarga dos tipos de solo do Distrito Federal.....	38
Tabela 2. Potencial de recarga dos compartimentos geomorfológicos do Distrito Federal. ...	38
Tabela 3. Uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal.	47

LISTA DE SIGLAS

ADASA	Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal
ANA	Agência Nacional de Águas
APM	Área de Proteção de Manancial
APP	Área de Proteção Permanente
CAESB	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CGPDI	Coordenação-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento Institucional
CODEPLAN	Companhia de Planejamento do Distrito Federal
EMATER	Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ETA	Estação de Tratamento de Água
ESECAE	Estação Ecológica de Águas Emendadas
GDF	Governo do Distrito Federal
GEE	Google Earth Engine
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPEDF	Instituto de Pesquisa e Estatística do Distrito Federal
PDOT	Plano Diretor de Ordenamento Territorial
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
RIDE-DF	Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno
RL	Reserva Legal
SEAGRI	Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento e Desenvolvimento Rural
SEDUH	Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Habitação
SEMA	Secretaria de Meio Ambiente
SEMATEC	Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal
SIN	Sistema Interligado Nacional
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação
SWAT	Soil and Water Assessment Tool / Ferramenta de Avaliação de Solo e Água
TNC	The Nature Conservancy
ZEE	Zoneamento Ecológico Econômico

IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA GESTÃO E CONSERVAÇÃO DAS ÁREAS DE PROTEÇÃO DE MANANCIAIS NA BACIA DO PIPIRIPAU NO DISTRITO FEDERAL

1 INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são indispensáveis para o desenvolvimento da economia de um território, bem como para o provimento da manutenção das atividades essenciais à sobrevivência humana. No entanto, as atividades humanas realizadas no seu entorno têm provocado significativa queda na qualidade e na disponibilidade da água e biodiversidade, decorrente das alterações do ambiente físico, químico e biológico (OKUMURA *et al.*, 2020).

O uso e a ocupação do solo em bacias hidrográficas tem sido um tema cada vez mais relevante e crítico em todo o mundo, especialmente em países como o Brasil, onde a disponibilidade e a gestão dos recursos hídricos são de extrema importância para o desenvolvimento socioeconômico e a sustentabilidade ambiental (WORLD BANK, 2021). Nesse contexto, a ocupação desordenada e o uso inadequado dos solos em bacias hidrográficas podem levar a uma série de problemas ambientais, como a degradação do solo, o assoreamento dos rios, a redução da qualidade e a quantidade de água disponível e a perda da capacidade de infiltração (DAMAME; LONGO; DIAS, 2019).

No Brasil, a Lei nº 9.433, datada de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), reconhecida como Lei das Águas, estabeleceu os fundamentos, as orientações e os mecanismos indispensáveis para a condução da administração dos recursos hídricos em âmbito nacional. Essa legislação tem como pilar central a concepção de bacia hidrográfica como a unidade territorial de planejamento e de gestão, sustentando-se na compreensão da interdependência entre os corpos d'água e na imperiosidade de uma abordagem integrada.

Nos estados brasileiros, a gestão hídrica segue as diretrizes estabelecidas pela Lei das Águas. No entanto, cada estado detém a autonomia para desenvolver suas próprias políticas e regulamentações, adaptando-as às peculiaridades locais. No Distrito Federal, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) lançou as bases para a gestão ambiental e dos recursos hídricos, e previu a criação de Áreas de Proteção de Mananciais (APMs). Tais áreas, correspondem, em geral, a pequenas bacias de drenagem, onde o desenvolvimento de atividades tem impacto direto e imediato na qualidade e na disponibilidade da água em pontos de captação. Essas áreas foram categorizadas como Áreas de Diretriz Especial, pelo PDOT publicado no ano

de 1997, que enfatiza a natureza ímpar desses locais, demandando orientações específicas quanto ao uso e a ocupação do solo. Destaca-se que parte das áreas protegidas do Distrito Federal possuem nomenclatura própria, não constante no Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), como Reservas Ecológicas, Parques Ecológicos e de Uso Múltiplo e Áreas de Proteção de Mananciais (APMs).

Nesse contexto, torna-se imprescindível abordar os diversos aspectos que abarcam as APMs, que incluem desde a sua delimitação e seu mapeamento, até a definição de normas e de regulamentos específicos. Isso envolve a criação de instrumentos legais e institucionais, que auxiliem no aprimoramento da capacidade de monitoramento e de fiscalização. Além disso, para efetivar com êxito as ações de manejo e gestão das APMs, é fundamental estabelecer uma colaboração efetiva entre os diversos intervenientes, tais como os governos, a sociedade civil, o setor privado e a academia.

A gestão integrada da bacia hidrográfica é apontada como o instrumento orientador para as ações do poder público e da sociedade a longo prazo, visando o controle do uso dos recursos ambientais, naturais, econômicos e socioculturais na área de abrangência da bacia hidrográfica, com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável (ALVIM; COLLET; KATO, 2012).

Nos últimos anos, o Distrito Federal tem experimentado um padrão de crescimento urbano, sobretudo em áreas rurais que são essenciais para o abastecimento público (PASSOS *et al.* 2020). Entre 2016 e 2018, a região enfrentou uma séria crise hídrica que impactou significativamente os principais pontos de captação de água, comprometendo os reservatórios fundamentais para o abastecimento da população. Durante esse período, os níveis dos principais reservatórios encontravam-se abaixo do volume útil, levando à necessidade de implementação de medidas rigorosas, como o racionamento. Essa crise foi desencadeada principalmente pela baixa precipitação em anos consecutivos, resultando na redução significativa da vazão dos reservatórios geridos pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB, 2018).

Sabe-se que a gestão eficiente dos recursos hídricos da bacia depende de informações precisas sobre o uso da terra e a permeabilidade do solo. Dessa forma, este estudo contribuirá para um diagnóstico da bacia que é fundamental para entender o impacto da ocupação do solo nas APMs, especialmente nas regiões que estão sofrendo expansão agrícola. Os resultados obtidos fornecerão informações valiosas para a gestão e uso sustentável da APM e dos recursos hídricos presentes na bacia. A área da referida bacia, foi escolhida por enfrentar atualmente

conflitos devido a escassez hídrica, uma vez que não tem suprido a demanda hídrica nos meses de estiagem.

Além disso, o presente estudo busca também compreender a evolução da supressão vegetal em pontos estratégicos, que são fundamentais para a manutenção do abastecimento urbano.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo geral realizar análise do uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão do Pípiripau, localizada no Distrito Federal, com o intuito de analisar áreas críticas com potencial de infiltração com ênfase na Área de Proteção de Manancial Pípiripau.

Para isso tem como objetivos específicos:

1. Elaborar um mapa de uso e ocupação do solo da bacia do Ribeirão Pípiripau- DF para o ano de 2024;
2. Mapear o potencial de infiltração do solo na bacia para destacar as áreas críticas de impermeabilidade que possam comprometer a infiltração de água e aumentar o escoamento superficial; e
3. Prover informações essenciais para a gestão territorial e conservação da APM da bacia do Ribeirão Pípiripau, para embasar decisões alinhadas com a sustentabilidade dos recursos hídricos e o uso consciente do solo em áreas sensíveis para o abastecimento hídrico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Impacto do uso e cobertura dos solos na gestão hídrica

Nos últimos anos, o avanço da urbanização nas bacias hidrográficas tem se intensificado, impulsionado principalmente pelas mudanças no uso e ocupação do solo, resultando na expressiva supressão da vegetação nativa. Essa transformação compromete o equilíbrio ambiental dessas áreas, uma vez que a dinâmica das bacias depende da interação entre fatores naturais e antrópicos, como a cobertura vegetal, o clima, as características pedológicas, a geomorfologia e o próprio uso do solo (BIAS *et al.*, 2012). Essas mudanças têm implicações significativas, como a perda de biodiversidade, o aumento da impermeabilização do solo e o potencial aumento na disseminação de vetores e doenças relacionadas à água (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2022).

Segundo dados da The Nature Conservancy (TNC) divulgados em 2022, a cobertura vegetal nativa apresentou uma redução significativa nas proximidades das bacias hidrográficas que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável pela geração de energia e pelo abastecimento público nas regiões Sudeste e Centro-Oeste do Brasil. Essa perda, associada às mudanças de longo prazo no uso do solo, pode ter agravado as crises hídricas ocorridas nessas regiões entre 2014 e 2016.

Essa tendência de redução da vegetação nativa não é um fenômeno isolado, mas parte de um processo mais amplo e contínuo de transformação do território brasileiro. De acordo com a análise do MapBiomas (2023), que abrange o período de 1985 a 2022, sobre o uso e a ocupação das terras no Brasil, destaca-se um acelerado aumento na perda de vegetação nativa nos últimos 10 anos. O estudo revela que a degradação ambiental se intensificou nesse período, apesar da aprovação do Código Florestal. O avanço da agropecuária foi uma tendência notável em praticamente todos os biomas brasileiros. Os dados também apontam o impacto significativo das atividades humanas na transformação do território brasileiro, com implicações em emissões de gases de efeito estufa, conservação da biodiversidade e regulação do regime de chuva.

Neste contexto, o uso e a ocupação do solo nas áreas agrícolas, aliado à crescente urbanização em bacias hidrográficas, costuma desencadear alterações no curso das águas, criando obstáculos e vias preferenciais de escoamento (MARASLIS, 2022). Conforme observado por Meerkhan *et al.* (2022), essas mudanças geotécnicas impactam diretamente as fontes de recarga dos aquíferos. Como resultado, ocorrem modificações nos padrões de fluxo dos riachos, intensificando os riscos associados à qualidade das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas. No entanto, é relevante destacar que as áreas vegetadas desempenham um papel atenuante nesse efeito de impermeabilização e escoamento superficial (MEERKHAN *et al.*, 2022).

Aquino (2020) destaca a importância da recomposição das áreas verdes próximas ao perímetro urbano, uma ação essencial para regular o fluxo de enxurradas, controlar a temperatura e aumentar a infiltração de água no solo. A autora também enfatiza a relevância das soluções baseadas na natureza para o controle da erosão ao longo das margens dos córregos locais em microbacias.

Da mesma forma que o aumento dos aglomerados urbanos, a expansão das áreas agrícolas, e a exploração dos recursos naturais, são exemplos de ações antrópicas que impactam a cobertura do solo e que, aliadas ao desenvolvimento contínuo e mal planejado, geram impactos ambientais e socioeconômicos que necessitam de medidas mitigadoras (SANTOS *et*

al., 2019). Nesse processo, o ciclo hidrológico é totalmente alterado, dificultando a infiltração de água no solo, seja pelo desmatamento e/ou uso e manejo das áreas agrícolas, ou pelo escoamento superficial das áreas urbanas devido a impermeabilização dos solos.

Além disso, como destacado por Guedes *et al.* (2023), a conversão do uso do solo para atividades agrícolas exerce um impacto significativo no aumento das concentrações de fósforo total e nitrogênio total nos corpos d'água, exercendo uma influência direta na qualidade das águas. A magnitude dessa mudança nas cargas de nutrientes está intrinsecamente ligada ao grau de alteração do solo, às modificações no processo de transformação da precipitação em escoamento, às características topográficas do terreno, à natureza dos solos envolvidos e às práticas agrícolas adotadas.

Para lidar com esses impactos, a perspectiva apresentada por Loucks *et al.* (2005) sobre o planejamento e gestão dos recursos hídricos, torna evidente que uma gestão hídrica eficaz demanda uma abordagem integrada que não apenas considere, mas adote ativamente as práticas de uso e de conservação do solo. Suas análises ressaltam a importância de implementar medidas de conservação e manejo sustentável para enfrentar os impactos emergentes, estabelecendo, assim, os alicerces para uma gestão hídrica resiliente e equilibrada.

Segundo Figueiredo e Green (2019), isso pode incluir a criação de zonas de proteção de mananciais, regulamentação do uso do solo em áreas críticas, promoção de técnicas agrícolas sustentáveis e implementação de sistemas de drenagem urbana sustentável. Os desafios de relacionar os sistemas de produção agropecuária com os recursos hídricos no âmbito da bacia hidrográfica são significativos na atualidade, especialmente em um contexto de aceleração das mudanças no uso da terra. Esses desafios podem se intensificar ainda mais quando consideramos as mudanças climáticas projetadas (FIGUEIREDO; GREEN, 2019).

Antes da promulgação da Lei das Águas, a gestão dos recursos hídricos no Brasil era voltada principalmente para o desenvolvimento de infraestrutura, como a construção de barragens e usinas hidrelétricas, sem uma visão integrada de sustentabilidade. Nesse contexto, a Constituição Federal de 1988 representou um marco fundamental ao estabelecer a água como um bem de domínio público e definir as competências da União, dos estados e dos municípios para a gestão dos recursos hídricos (Art. 20 e Art. 26). Essa mudança na legislação foi um passo importante para reconhecer a água como um recurso natural essencial e de uso coletivo.

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que teve início nos anos 1990 com a promulgação da Lei nº 9.433/1997 (BRASIL, 1997), foi responsável por estabelecer princípios e diretrizes para a gestão integrada dos recursos hídricos, reconhecendo a importância da proteção dos mananciais como um dos pilares para a segurança hídrica.

Conforme estabelecido na Lei das Águas, os Planos de Recursos Hídricos são instrumentos fundamentais que têm como objetivo embasar e guiar a execução da PNRH, bem como a gestão dos próprios recursos hídricos. Esses planos assumem o papel de sugerir a delimitação de áreas sujeitas a restrições de uso, com a finalidade primordial de salvaguardar os recursos hídricos.

Assim, as Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) surgiram como resposta à necessidade premente de assegurar a disponibilidade e a qualidade da água para o abastecimento público. Esse surgimento se deu em decorrência das crescentes pressões urbanas e da degradação ambiental. O conceito de proteção de mananciais foi elaborado com base na compreensão da vital importância dos cursos d'água e das áreas circundantes para o fornecimento de água potável às cidades. No contexto brasileiro, a criação das APMs está intrinsecamente ligada às preocupações relacionadas à contaminação dos recursos hídricos, ao desmatamento, à erosão do solo e à urbanização desordenada, todos fatores que impactam tanto na qualidade quanto na quantidade de água disponível.

2.2 Potencial de Infiltração em Função do Uso, Cobertura e Tipo de Solo

A infiltração de água no solo representa um processo essencial para a sustentabilidade dos recursos hídricos, promovendo a recarga de aquíferos, o abastecimento dos corpos d'água e a preservação dos ecossistemas. Esse fenômeno é influenciado pela textura e estrutura do solo, pela cobertura vegetal e pela geomorfologia da área, elementos que, em conjunto, desempenham papel fundamental na regulação do escoamento superficial e no controle da erosão (JAGDALE; NIMBALKAR, 2012).

Nesse contexto, o uso de geotecnologias surge como uma ferramenta estratégica para compreender e gerenciar esses processos de forma mais eficiente. Conforme Nascimento, Carvalho e Costa (2017), a utilização de geotecnologias para mapear mudanças na cobertura vegetal e no uso do solo é fundamental para o planejamento urbano e ambiental. Essas tecnologias possibilitam a obtenção de dados espaciais que auxiliam no monitoramento de áreas protegidas, como as Áreas de Preservação Permanente (APPs) e Unidades de Conservação, além de identificar regiões suscetíveis à erosão e ao escoamento superficial em áreas impermeabilizadas. Ademais, permitem apontar locais estratégicos para iniciativas de reflorestamento e intervenções que favoreçam a infiltração de água, especialmente em zonas com vegetação nativa, onde a capacidade de infiltração é naturalmente maior.

A infiltração da água no solo ocorre de maneira diferenciada, dependendo do grau de saturação. Conforme Aguiar *et al.* (2007), em solos saturados, a água infiltra-se principalmente

devido à ação da gravidade, movendo-se rapidamente através de fissuras, raízes decompostas ou outros caminhos preferenciais, em vez de se infiltrar de forma uniforme. Nesse caso, como os poros já estão completamente preenchidos com água, a capacidade de infiltração é limitada, e o excesso de água tende a gerar escoamento superficial. Por outro lado, em solos não saturados, a infiltração ocorre de forma mais complexa. A água se move para baixo devido à força da gravidade, mas também é influenciada pelas forças de capilaridade (adesão e coesão), que ajudam a distribuir a água lateralmente e para cima, preenchendo os poros menores. Esse processo cria uma frente de umedecimento que avança gradualmente, permitindo que o solo retenha água de maneira mais eficiente. A combinação desses fatores faz com que solos não saturados tenham uma maior capacidade de infiltração em comparação com solos saturados.

O uso inadequado do solo, como a conversão de áreas naturais em superfícies impermeáveis ou a exploração intensiva para atividades agrícolas, tem impacto direto na capacidade de infiltração da água. Conforme Melo *et al.* (2011), as alterações na dinâmica de uso e cobertura do solo em bacias hidrográficas reduzem significativamente essa capacidade, aumentando o risco de enchentes e inundações. Em contraste, áreas com vegetação nativa e baixa declividade apresentam maior permeabilidade do solo, devido à proteção contra o escoamento superficial e à menor exposição à erosão, o que favorece a recarga hídrica e a estabilidade do solo (JAGDALE; NIMBALKAR, 2012).

Essa diferença na capacidade de infiltração entre áreas naturais e antropizadas reforça a importância de técnicas avançadas para monitorar e gerenciar o uso do solo. Estudos recentes têm empregado tecnologias como sensoriamento remoto e análise de dados multiespectrais para aprimorar a classificação do solo e o monitoramento de bacias hidrográficas. Essas ferramentas permitem uma avaliação mais precisa das mudanças no uso do solo e contribuem para a mitigação de riscos hidrológicos, além de auxiliar na preservação dos recursos hídricos (SRIDEVY *et al.*, 2023). De acordo com estes autores o uso de dados de sensoriamento remoto, como imagens do satélite Sentinel-2, combinado com modelos de aprendizado de máquina, melhora a precisão na classificação do solo e na identificação de áreas com alta e baixa infiltração, proporcionando subsídios para políticas de gestão sustentável de bacias hidrográficas.

2.3 Produção de sedimentos em Bacias Hidrográficas

A produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica é intensificada por fatores relacionados à estrutura do solo, cobertura vegetal e topografia do terreno. Esse processo ocorre

mais facilmente em regiões com alta declividade, baixas taxas de infiltração de água e/ou desmatamento extensivo para cultivo agrícola e pastagem (LOPES *et al.*, 2022). Embora a produção de sedimentos seja um processo complexo influenciado por diversas fontes, sejam elas naturais ou decorrentes de atividades humanas, é notável que o impacto ambiental significativo associado aos sedimentos geralmente provém das atividades antrópicas, uma vez que as taxas de erosão natural do solo tendem a ser relativamente baixas (RAMOS-SCHARRÓN; MCDONALD, 2007).

Nesse sentido, atividades humanas e o clima são dois fatores-chave que afetam os processos hidrológicos e de erosão do solo. Compreender seus impactos no escoamento de água e no transporte de sedimentos é muito importante para o desenvolvimento sustentável das bacias hidrográficas, especialmente em regiões subtropicais com alta precipitação e altas cargas de sedimentos (WEI *et al.*, 2023).

No contexto brasileiro, o crescente interesse na compreensão das fontes de produção de sedimentos em bacias hidrográficas está intrinsecamente ligado à preocupação com a qualidade da água (MIGUEL *et al.*, 2014). A presença de sedimentos nos corpos d'água pode afetar negativamente a qualidade da água, aumentando a turbidez e prejudicando a vida aquática, além de transportar poluentes associados aos sedimentos (REIS; BRANDÃO, 2013). Além disso, é importante considerar a conservação de áreas-chave para a recarga dos aquíferos e a manutenção da qualidade hídrica das bacias, uma vez que a preservação de florestas, áreas úmidas e vegetação ciliar desempenha um papel fundamental na regulação do fluxo de água, na redução da erosão do solo e na filtragem de poluentes. Esses ecossistemas contribuem diretamente para a manutenção da qualidade da água em toda a bacia hidrográfica, garantindo a sustentabilidade dos recursos hídricos (TIECHER *et al.*, 2014).

Por exemplo, Nascimento (2021) investigou a distribuição de sedimentos em uma bacia hidrográfica do Nordeste do Brasil, identificando fontes difusas dominantes e sua relação com a contaminação por metais. O autor destacou a importância desses estudos para o entendimento dos processos de transporte de sedimentos e para a implementação de estratégias de gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas como a estudada. Já Ferreira e Casatti (2006) estudaram os impactos da agricultura na produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica no sudeste do Brasil, ressaltando a relação entre atividades agrícolas e a qualidade da água. Nesse sentido, Tiecher *et al.* (2014) enfatizam que o conhecimento das principais fontes difusas de produção de sedimentos pode ser essencial para a implementação de estratégias eficazes de gestão da bacia hidrográfica e conservação dos solos.

De acordo com Primavesi (1984), práticas alternativas de uso e manejo do solo, baseadas na manutenção da cobertura vegetal e na recuperação da matéria orgânica, podem reduzir significativamente a erosão e a perda de sedimentos, favorecendo a infiltração da água e a sustentabilidade do sistema agrícola. Além disso, a integração de dados observados em escala de parcela e bacia hidrográfica com o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) foi fundamental para avaliar os impactos individuais e combinados das mudanças no uso do solo e das opções de manejo na redução do escoamento e da perda de sedimentos. A combinação dessas práticas com a classificação da capacidade da terra não só otimiza o uso do solo, mas também minimiza os impactos ambientais adversos.

Portanto, diante da interconexão entre produção de sedimentos, qualidade da água e conservação de áreas importantes para a recarga dos aquíferos, Oliveira *et al.* (2016) pontuam que é essencial continuar investindo em estudos para avaliar e mitigar os impactos dos sedimentos nos recursos hídricos, garantindo assim a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos e o fornecimento de água de qualidade para as comunidades locais.

2.4 Enquadramento legal e uso sustentável das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) no Distrito Federal

O art. 31 da Lei nº 9.433/97 (BRASIL, 1997) determina que, na implementação da PNRH, os Poderes Executivos do Distrito Federal e dos municípios devem promover a integração das políticas locais de saneamento básico, uso, ocupação e conservação do solo e meio ambiente com as políticas federal e estaduais de recursos hídricos. Nesse contexto, em 1997, o Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) do Distrito Federal introduziu as APMs como uma categoria de zoneamento com o propósito específico de proteger áreas estratégicas para o abastecimento público urbano. Para tanto, o PDOT estabeleceu critérios para delimitar essas áreas, considerando a localização das nascentes, topografia, vegetação e pontos de contaminação do lençol freático.

No âmbito dessa legislação, as APMs foram estabelecidas como uma categoria específica de zoneamento, destinadas à conservação, à recuperação e ao manejo das bacias hidrográficas a montante dos pontos de captação da Companhia de Água e Esgotos de Brasília (CAESB). A finalidade principal dessas áreas é garantir a preservação dos recursos hídricos, especialmente nas regiões críticas de captação de água para o abastecimento público.

Visando regulamentar os mecanismos de gestão das Áreas de Proteção de Manancial, o Decreto nº 18.585, publicado em setembro de 1997 no Distrito Federal, estabeleceu diretrizes

para a aplicação do artigo 30 do Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT). Entre as medidas propostas, destacou-se a formação dos Comitês de Bacias Hidrográficas dos Pequenos Mananciais de Abastecimento Público. Esses comitês teriam como área de atuação os polígonos de contribuição e zonas adjacentes, com o intuito de incluir a participação de membros da sociedade civil vinculados às captações de água e de moradores das bacias hidrográficas correspondentes, sob a supervisão da Secretaria de Meio Ambiente do Distrito Federal (SEMATEC). O objetivo principal era desenvolver planos de gestão e uso sustentável para cada Área de Proteção de Manancial (APM), com a meta de transformar essas áreas em Unidades de Conservação. No entanto, essa iniciativa não se efetivou, e a revisão do PDOT em 2009 manteve as 26 áreas, com a flexibilidade de definir novas APMs (IPEDF, 2023).

As diretrizes estabelecidas pelo Decreto nº 18.585, de setembro de 1997, para APMs abrangem a preservação da vegetação nativa, restauração de áreas degradadas, controle rigoroso de efluentes, proibição de atividades poluentes e mineração, exigência de licenciamento ambiental, controle do uso de águas subterrâneas e restrições ao parcelamento urbano e rural. Inicialmente, a gestão das APMs foi atribuída à CAESB através desse Decreto, com a colaboração de outros órgãos para fiscalização e supervisão. No entanto, no cenário atual, a responsabilidade pela gestão e monitoramento está sob a supervisão da Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Distrito Federal (SEMA) e da Secretaria de Estado de Desenvolvimento Urbano e Habitação do Distrito Federal (SEDUH).

A gestão das APMs desempenha um papel essencial na preservação dos recursos hídricos, sendo de grande interesse tanto na política de recursos hídricos quanto na política ambiental. Os princípios estabelecidos na Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) desempenham um papel fundamental no estabelecimento de diretrizes para a gestão hídrica. Em momentos de escassez, a PNRH destaca que a prioridade no uso da água deve ser dada ao consumo humano e à dessedentação de animais, sendo essa diretriz essencial diante da frequente escassez hídrica enfrentada por muitas APMs, afetando o fornecimento de água às áreas urbanas. Assim, a preservação dessas áreas torna-se vital para garantir o acesso à água potável às comunidades urbanas locais.

Atualmente, o Distrito Federal conta com 26 APMs, que englobam diferentes regiões, como Capão da Onça, Brazlândia, Currais, Pedras, Contagem, Paranoazinho, Corguinho, Mestre D'Armas, Brejinho, Quinze, Cachoeirinha, Taquari, Alagado, Catetinho, Ponte de Terra, Crispim, Olho d'Água, Fumal, Bananal, Torto/Santa Maria, Pípiripau e Barrocão. A localização e nomenclatura são apresentadas na figura 1.

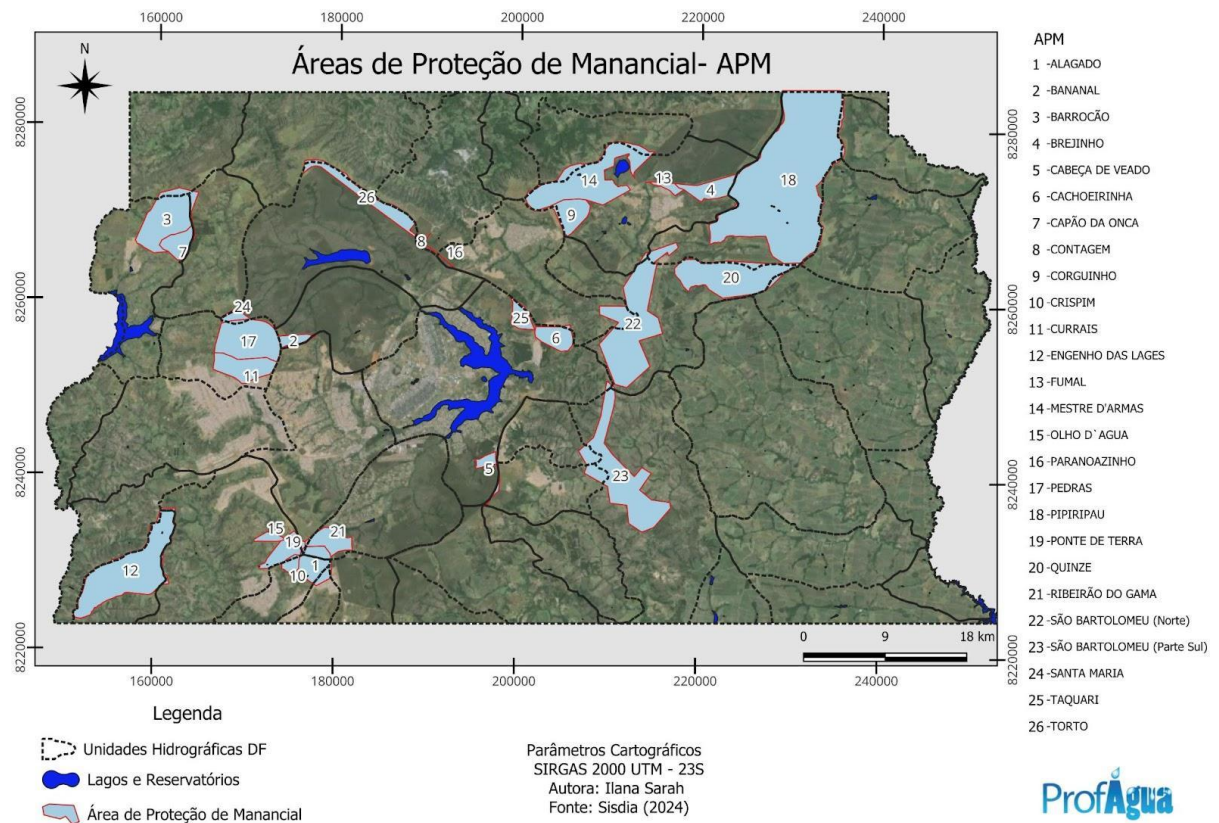


Figura 1. Localização das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)

As ocupações irregulares sobre as Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) constituem um dos principais impactos, já que promovem a impermeabilização do solo, geram processos erosivos e sobrecarregam os aquíferos, devido às captações irregulares (IPEDF, 2023). Nesse contexto, a Portaria Conjunta N° 04, de 20 de outubro de 2020, representa um marco na gestão dos recursos hídricos e na preservação ambiental no Distrito Federal. Emitida pelas Secretarias de Meio Ambiente e de Desenvolvimento Urbano e Habitação (SEDUH), essa regulamentação estabelece diretrizes para a gestão das APMs da região. No entanto, a eficácia da Portaria depende diretamente de uma fiscalização contínua, do envolvimento ativo da sociedade civil e da implementação de políticas de planejamento urbano sustentável, as quais devem harmonizar o desenvolvimento econômico com a conservação ambiental.

Embora a Portaria Conjunta n° 04, de 20 de outubro de 2020, represente um importante instrumento para a proteção dos recursos hídricos e para a garantia de água de qualidade à população do Distrito Federal, alinhando-se aos princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e da sustentabilidade ambiental, faz-se necessária uma revisão das políticas públicas relacionadas à gestão das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs).

Essa revisão deve focar na implementação de medidas eficazes para o gerenciamento e monitoramento dessas áreas, considerando que envolvem temas sensíveis, como as ocupações irregulares, que demandam programas governamentais específicos para conter a grilagem de terras e o desmatamento em áreas ambientalmente vulneráveis.

2.5 Crise hídrica no Distrito Federal

Um estudo conduzido pelo Governo do Distrito Federal (GDF), em colaboração com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) e a Coordenação-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento Institucional (CGPDI) em 2019 (GDF, 2019), analisou as tendências das mudanças climáticas na Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE-DF). Ao considerar o período histórico de 1961 a 2005 e as projeções de 2006 a 2099, os resultados apontaram para um aumento generalizado da temperatura, evidenciando ondas de calor. Além disso, foi previsto uma redução significativa na precipitação durante os períodos chuvosos, com a ocorrência de eventos extremos, especialmente no Distrito Federal. As projeções climáticas destacam reduções substanciais na precipitação ao longo do século 21, com ênfase no verão, sendo a estação da primavera a mais afetada no final do século. Os cenários estudados, juntamente com os modelos climáticos, não só indicam diminuições na taxa de precipitação, mas também apontam para um aumento da temperatura, conforme detalhado na Nota Técnica sobre Mudança Climática no DF e RIDE (2016).

A crise hídrica que atingiu o Distrito Federal entre os anos de 2016 e 2018 foi um fenômeno multifacetado, influenciado por uma variedade de fatores. O rápido crescimento populacional e a urbanização desordenada exerceram uma pressão significativa sobre os recursos hídricos da região. De acordo com Lima *et al.* (2018), as raízes dessa crise estão profundamente ligadas a desafios como o crescimento populacional acelerado, a expansão desordenada do território, questões climáticas, falta de planejamento e gestão eficiente dos recursos hídricos, além da insuficiência de infraestrutura para garantir o suprimento adequado de água para diversas finalidades.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), a população do Distrito Federal atingiu 2.817.068 habitantes, um acréscimo de 246.908 pessoas em relação a 2010, representando um crescimento de 9,6%. Esse percentual supera a média nacional, que foi de 6,5% no mesmo período. Já a Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno (RIDE-DF) passou de 3.910.824 habitantes em 2010 para 4.483.006 em 2022, um aumento de 14,6%, correspondente a 572.182 pessoas.

Nesse sentido, o Distrito Federal apresenta uma das maiores densidades demográficas do país, com cerca de 478 habitantes por km², valor muito superior à média nacional, que é de aproximadamente 25 habitantes por km². A concentração populacional é maior no Plano Piloto e em cidades satélites como Ceilândia, Taguatinga e Samambaia, enquanto as áreas rurais e regiões mais afastadas apresentam menor ocupação.

Além do crescimento demográfico, a crise foi agravada pela ocorrência do fenômeno climático El Niño, que provocou uma prolongada estiagem (PEREIRA FILHO, 2022). O período entre 2015 e 2017 foi caracterizado por chuvas abaixo da média histórica, culminando em uma situação crítica nos reservatórios de água. No ano de 2017, o DF registrou apenas 948 mm de chuva, muito abaixo da média anual de aproximadamente 1.400 mm (CAESB, 2018).

A crise hídrica no Distrito Federal destacou a importância de abordagens integradas, envolvendo políticas públicas, planejamento urbano eficiente e estratégias para enfrentar os desafios das mudanças climáticas. As lições aprendidas com essa crise orientam as ações futuras, visando a construção de uma resiliência maior diante de eventos climáticos extremos e garantindo o acesso sustentável à água para a população. Nesse sentido, é fundamental compreender a estrutura do sistema de abastecimento hídrico do DF, que depende de múltiplas fontes para atender às demandas da população.

O Distrito Federal possui um sistema complexo de abastecimento hídrico, composto por diversas fontes. De acordo com dados da CAESB, o Sistema Produtor Descoberto é responsável por atender quase 50% da população do DF, abastecendo cidades com alta densidade demográfica como Ceilândia, Taguatinga e Samambaia. Em seguida, o Sistema Santa Maria/Torto contribui com aproximadamente 20% da demanda.

Também integra o Sistema Produtor Corumbá, inaugurado em 2022, que responde por 12% da capacidade instalada e tem potencial para atender até 2,5 milhões de habitantes em sua etapa final. Já o Lago Paranoá, utilizado como fonte de abastecimento desde 2017, tem seu tratamento realizado na ETA Lago Norte, oferecendo uma alternativa estratégica para períodos de escassez.

A Bacia do Pípiripau, que inclui a Barragem do Pípiripau também contribui como fonte de abastecimento e irrigação para regiões de Planaltina-DF e Sobradinho. Além disso, poços tubulares profundos, que exploram aquíferos subterrâneos, também são utilizados como fontes complementares de abastecimento hídrico no DF. A gestão equilibrada e descentralizada dessas fontes é fundamental para atender às demandas populacionais, especialmente em um contexto de variabilidade climática e crescimento urbano acelerado.

Durante a crise hídrica no Distrito Federal, o Sistema Sobradinho-Planaltina enfrentou desafios significativos na gestão da água. Esse sistema, caracterizado por numerosas captações superficiais e subterrâneas, abastecia diversas regiões administrativas, incluindo Sobradinho I e II, Vale do Amanhecer e Planaltina-DF. De acordo com a ADASA, são nove captações superficiais e 53 captações subterrâneas. Embora o sistema demonstre pouca dependência das barragens do Descoberto e Santa Maria, sua operação é fortemente vinculada a captações superficiais a fio d'água, o que o torna vulnerável a qualquer variação de precipitação que afete a vazão do Rio Piripipau.

Além disso, os níveis dos reservatórios não são influenciados apenas pelos regimes de chuva, mas também dependem das recargas dos aquíferos e dos investimentos destinados à captação, transporte e armazenamento, visando aumentar a capacidade de oferta dos sistemas (PAVIANI; COSTA; CASTRO, 2018). Nos últimos anos, o Distrito Federal experimentou um crescimento populacional e expansão urbana, o que demandou a implementação de medidas estruturais e operacionais essenciais para conter a crise hídrica. Diante desse cenário, a Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) adotou medidas de contingência, incluindo o racionamento de água para a população. Como resultado, a escassez hídrica impactou significativamente a vida cotidiana, evidenciando a vulnerabilidade do abastecimento e a urgência de uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

Além dos desafios demográficos, a ocupação desordenada do solo e o crescimento de áreas informais também contribuíram para a crise. A falta de regulamentação e outorga para o uso da água complicou ainda mais a situação. Um grande número de terrenos sem registro tornou-se um obstáculo tanto para a gestão dos recursos hídricos quanto para a expansão adequada da infraestrutura de abastecimento de água na região (CODEPLAN, 2020).

A referida crise hídrica no DF ressaltou a urgente necessidade de uma gestão sustentável dos recursos hídricos, considerando não apenas o crescimento populacional, mas também os desafios das mudanças climáticas. Além disso, destacou a importância de regulamentações eficazes, planejamento urbano adequado e estratégias para a regularização fundiária, especialmente em áreas críticas para a segurança hídrica da região (LIMA *et al.* 2018).

2.6 Bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau no Distrito Federal

O Ribeirão Pipiripau tem sua nascente no estado de Goiás e integra a bacia do Ribeirão Pipiripau (DF/GO), que, por sua vez, faz parte da bacia do Rio São Bartolomeu, afluente do

Rio Corumbá, pertencente à bacia do Rio Paraná. Localizada na região nordeste do Distrito Federal, essa bacia ocupa uma área de 235,3 km², caracterizada por um relevo predominantemente plano a suave-ondulado, com altitudes que variam entre 905 e 1.225 metros (ANA, 2010). Além disso, suas águas são responsáveis pelo abastecimento de aproximadamente 180 mil habitantes do DF (LIMA *et al.*, 2018).

Além de desempenhar um papel essencial na produção agrícola, a bacia do Ribeirão Pípiripau enfrenta desafios significativos na gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente devido aos conflitos de uso entre o abastecimento humano e a irrigação agrícola (ANA, 2010). Esse cenário reforça a necessidade de estratégias eficazes de conservação e uso racional da água.

A área da bacia abrange núcleos rurais como Taquara, Pípiripau e Santos Dumont, além de áreas rurais, incluindo Pípiripau 2, parte do Córrego Mestre D'Armas e o Assentamento da Reforma Agrária Oziel Alves III, todas caracterizadas por uma forte vocação agrícola. Entre seus principais afluentes, destacam-se os córregos Maria Velha, Sítio Novo, Engenho, Taquara e Capão Grande, essenciais para a manutenção do fluxo hídrico da bacia (ADASA, 2019).

O processo de ocupação dessa região teve início entre 1977 e 1983, quando foram constituídos os primeiros núcleos rurais, notadamente Taquara e Pípiripau, que rapidamente se consolidaram como importantes áreas de produção de hortaliças, com destaque para o pimentão. Nesse contexto, a adoção de tecnologias como irrigação localizada e cultivo protegido fortaleceu a produtividade, principalmente nos núcleos de Taquara e Pípiripau. Paralelamente, a organização dos produtores e o suporte técnico contínuo foram essenciais para a estruturação desse polo agrícola (ANA, 2010).

Nesse período, surgiu também o Núcleo Rural Santos Dumont, onde foi implementado um sistema coletivo de abastecimento de água para irrigação, conhecido como Canal Santos Dumont, essencial para manter as atividades agrícolas nos meses de março a outubro. Contudo, a década de 1980 trouxe uma rápida transformação do setor rural, impulsionada pela expansão de loteamentos urbanos, como Arapoanga e Vale do Amanhecer, o que intensificou os desafios ambientais e a vulnerabilidade hídrica da bacia (FIGUEIRÊDO; RAMOS; LIMA, *et al.*, 2018).

De acordo com Chaves e Piau (2008), a vegetação ripária original da bacia encontra-se parcialmente degradada, principalmente devido a ocupações irregulares, queimadas e o pisoteio de gado junto aos cursos d'água.

No que se refere à classificação dos solos, identificam-se sete categorias principais, conforme o antigo sistema brasileiro de classificação: Latossolo Vermelho-Escuro, Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolos, Areias Quartzosas, Solos Hidromórficos, Laterita

Hidromórfica e Terra Roxa Estruturada Similar (CODEPLAN, 2020). No entanto, segundo a EMBRAPA (1978), os Latossolos e Cambissolos são os mais predominantes na bacia, típicos do Cerrado. Esses solos são caracterizados por grande profundidade, alta porosidade, boa permeabilidade e drenagem eficiente, embora também sofram intensa lixiviação.

Entretanto, o Ribeirão Pípiripau vem sofrendo danos ambientais contínuos, principalmente devido à captação desordenada das águas superficiais, o que pode comprometer o abastecimento público e a irrigação no futuro (CBH – Paranaíba, 2023).

Além de suprir as demandas de irrigação agrícola, o Ribeirão Pípiripau é o principal manancial de abastecimento público para a população das regiões administrativas de Planaltina e Sobradinho. Ademais, sua bacia desempenha um papel crucial na produção de hortifrutigranjeiros, garantindo o abastecimento do Distrito Federal (AMORIM, 2022).

Para assegurar um monitoramento eficaz da hidrologia da bacia, a CAESB mantém um conjunto de cinco estações, responsáveis pela medição de níveis fluviais e precipitação. Essas estações – Estação Taquara-Jusante, Estação Pípiripau BR-020, Estação Pípiripau Montante Canal, Estação Pípiripau Montante Captação e Estação Frinocap DF-130 – operam em parceria com a ADASA e estão estrategicamente distribuídas ao longo da bacia para garantir um acompanhamento preciso dos recursos hídricos (Figura 2).

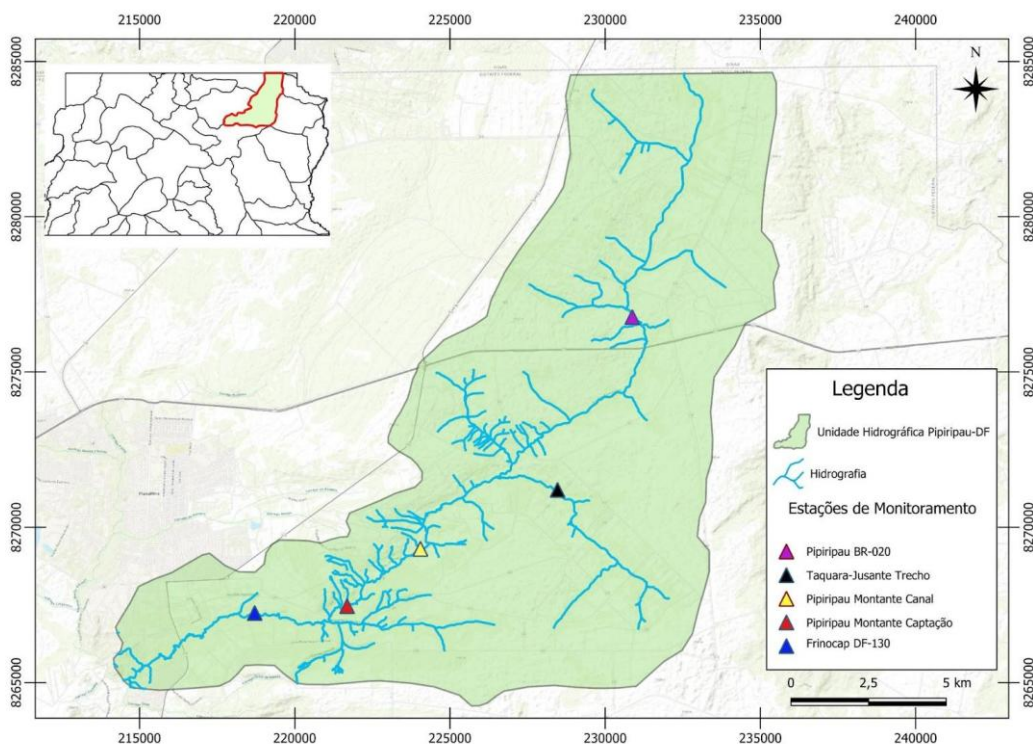


Figura 2. Delimitação da Unidade Hidrográfica do Rio Pípiripau no Distrito Federal e localização das estações de monitoramento hidrológico. Fonte: Autora (2024)

Nesse contexto, as transformações na bacia ao longo dos últimos anos têm sido fortemente influenciadas pelo uso e pela ocupação do solo, especialmente no que se refere à variação da vazão (DEL REY; CUNHA, 2021). Além das preocupações crescentes com o aumento da demanda hídrica, destaca-se um problema crítico: a expressiva redução da vazão natural na bacia. Esse fenômeno é claramente evidenciado na Figura 3, que demonstra uma tendência de declínio nas vazões médias anuais, conforme os registros da estação Frinocap. Entre os anos 1970 e 2023, a vazão média anual na bacia do Pípiripau sofreu uma redução significativa, passando de aproximadamente 3,7 m³/s para abaixo de 2,0 m³/s, com uma média global de 2,7 m³/s ao longo de todo o período. No entanto, a origem exata dessa diminuição ainda não foi plenamente identificada, podendo estar relacionada tanto a alterações climáticas que impactam a disponibilidade hídrica quanto ao aumento do consumo de água (MAIA; MIYAMOTO; GARCIA, 2018). Diante dessa conjuntura, torna-se essencial aprofundar a análise sobre as interações entre o uso e a cobertura do solo e as mudanças na dinâmica hidrológica da região.

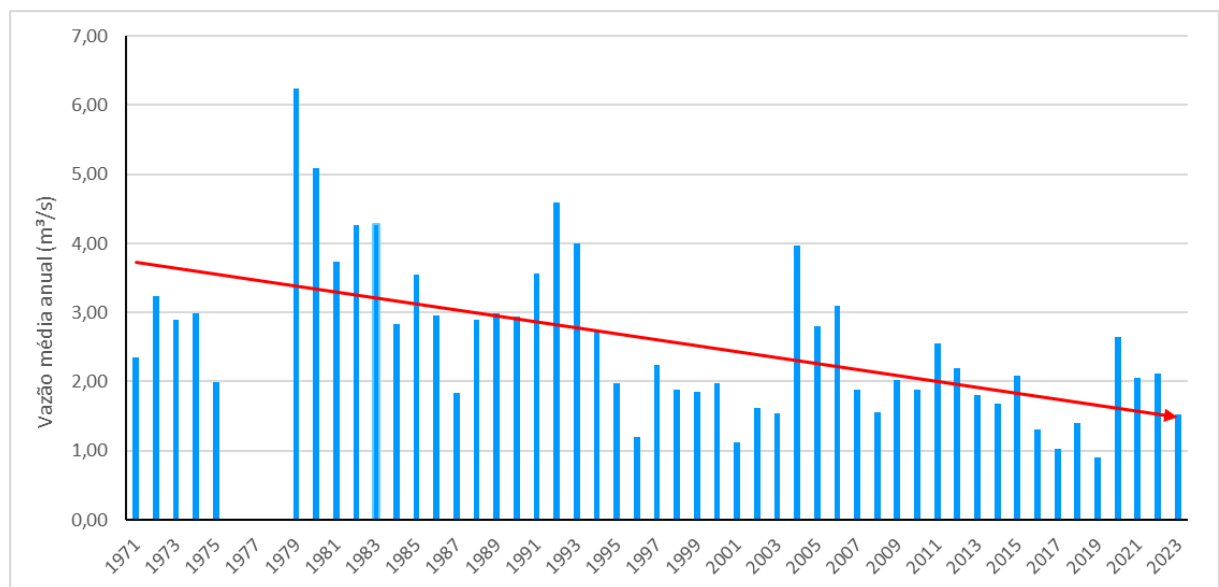


Figura 3. Série temporal de vazões médias anuais na estação Pípiripau Frinocap DF-30 e a linha de tendência de dados. Fonte: <https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/Relatorios/#/>

Ao longo das últimas cinco décadas, o monitoramento pluviométrico na bacia do rio Pípiripau tem sido conduzido pela CAESB, utilizando o pluviômetro estrategicamente posicionado em sua região central (Estação Taquara, Cód. 01547013). A análise da tendência, conforme mostrada na Figura 4, sugere uma leve redução na média anual de precipitação. É relevante destacar que essa diminuição, embora perceptível, não alcança significância

estatística, classificando assim a série de precipitação pluvial anual como estacionária, de acordo com o teste de tendência.

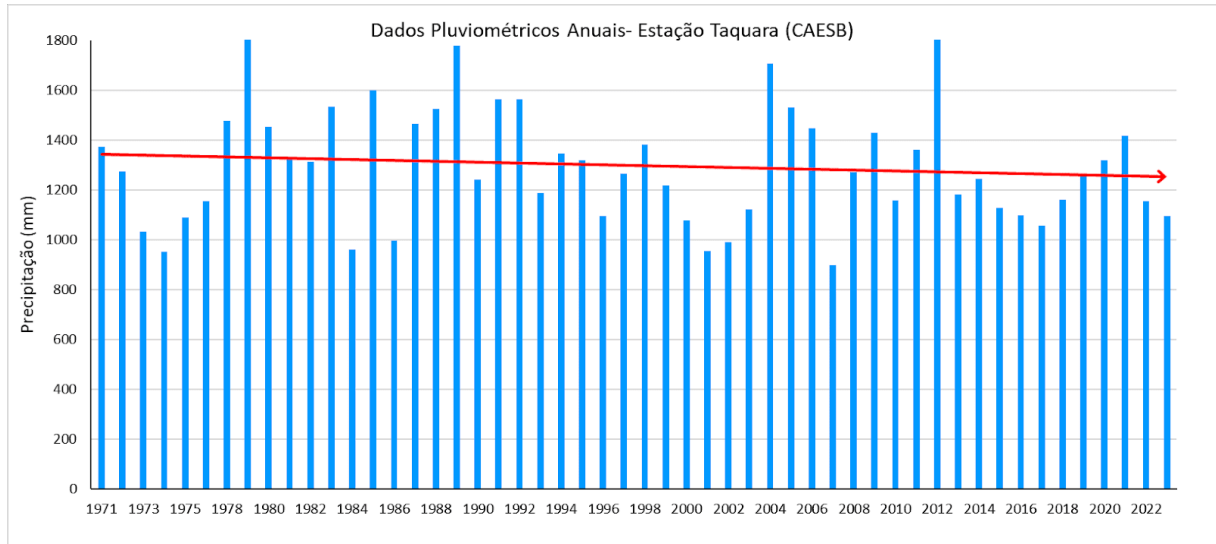


Figura 4. Dados Pluviométricos anuais- Estação CAESB Taquara.
Fonte: <https://atlas.caesb.df.gov.br/Hidrometeorologia/Relatorios/#/>.

Nesse sentido, com o propósito de solucionar conflitos relacionados à água, a Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA), em colaboração com a Agência Nacional de Águas (ANA), estabeleceu critérios para o uso e a negociação na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau, abrangendo áreas em Goiás e no Distrito Federal. As diretrizes da Resolução Conjunta nº 30/2020 determinam como as águas da bacia podem ser utilizadas, tanto para abastecimento público quanto para outras finalidades, como agricultura e criação de animais. A mencionada resolução define vazões mínimas remanescentes com o intuito de garantir as vazões ecológicas e os usos a jusante de cada trecho. Diante da análise dessas previsões, e quando necessário, são elaboradas propostas para a realocação e redução dos usos, a serem implementadas nos meses críticos pelos usuários da bacia.

A bacia do Ribeirão Pípiripau também se enquadra no âmbito do Programa "Produtor de Águas", uma iniciativa lançada pela Agência Nacional de Águas (ANA) em 2001, com o propósito central de revitalizar as bacias hidrográficas. Dentro desse programa, uma série de ações práticas são executadas, que abrangem desde o reflorestamento de Áreas de Proteção Permanente (APP) e Reserva Legal (RL) até a melhoria de estradas rurais e a implementação de práticas de conservação do solo e da água em áreas de produção, como lavouras e pastagens. O objetivo primordial dessas medidas é promover a infiltração eficaz da água no solo,

contribuindo assim para a recarga do lençol freático e mitigando o escoamento superficial, que é uma das principais causas de erosão e assoreamento dos corpos d'água nas áreas rurais (ANA, 2010).

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na região da bacia do Ribeirão Pipiripau, situada no nordeste do Distrito Federal (Figura 5). A bacia abrange uma extensão territorial de 235 km², sendo que 90% dessa área encontra-se dentro dos limites desta unidade federativa. Segundo informações da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) 80% da área da bacia é designada como Área de Proteção de Manancial (APM).

A bacia do Ribeirão Pipiripau está inserida na Região Administrativa de Planaltina, no Distrito Federal, apesar de ter a nascente do rio principal localizada na região de Planaltina de Goiás. Além disso, esta bacia está integrada à extensa bacia hidrográfica do Rio São Bartolomeu contribuindo com as bacias dos rios Paranaíba e Paraná.

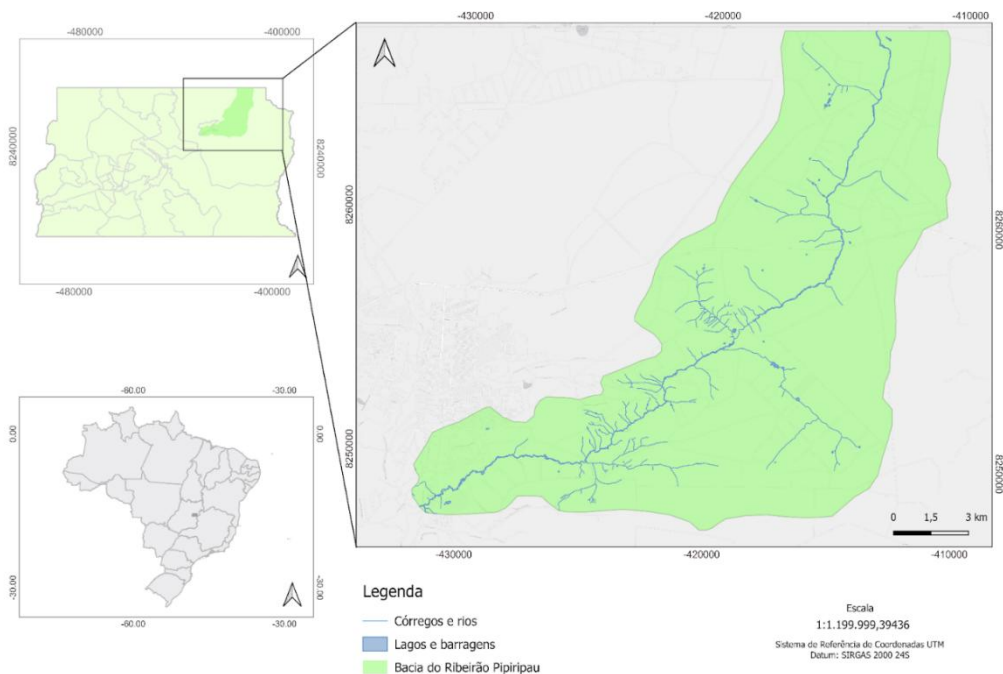


Figura 5. Localização da área de estudo na Bacia do Ribeirão Pipiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)

A bacia do Ribeirão Pipiripau abriga diversos núcleos rurais, incluindo Taquara, Pipiripau e Santos Dumont, bem como áreas rurais denominadas Pipiripau 2 e uma parcela do córrego Mestre D'Armas. Além disso, nessa região, encontra-se o Assentamento da Reforma Agrária Oziel Alves III, notório por suas atividades predominantemente agrícolas (ADASA, 2019)

O clima da região é do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (Alvares *et al.* 2013), com verão chuvoso e inverno seco e frio, e temperatura média anual de 21 °C, com média máxima de 22 °C em setembro e média mínima de 18 °C em julho. A precipitação anual varia entre 1.400 mm e 1.600 mm. No Distrito Federal a precipitação média anual é de aproximadamente 1.477,4 mm, com a maioria das chuvas concentradas entre os meses de outubro a abril (INMET, 2021).

Já a média anual de precipitação na bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau varia de 1.200 a 1.300 mm, enquanto em outras regiões do Distrito Federal esse valor pode superar 1.500 mm (ADASA, 2019). Nos três anos hidrológicos, 2016 a 2018, durante o período de escassez hídrica no Distrito Federal, observou-se uma redução significativa na média anual de precipitação em comparação com a média histórica de 1979 a 2018. Dados da CAESB (ano) indicam que a precipitação média no Distrito Federal ficou abaixo de 1.300 mm. Essa redução na precipitação pode ter influenciado a crise hídrica, resultando em déficits no abastecimento de água.

A bacia do Ribeirão Pipiripau está localizada na área central do bioma Cerrado, conhecida por possuir cerca de 90% de solos distróficos, que são pouco férteis, ácidos e com altos níveis de alumínio e ferro (RIBEIRO; WALTER, 1998). No entanto, muitos desses solos são profundos e bem drenados. O relevo da região é majoritariamente suave ondulado a ondulado, com inclinações moderadas que favorecem o escoamento das águas pluviais, tornando-o adequado para atividades agrícolas e contribuindo para a regulação hídrica da área (EMBRAPA, 1978). A geologia da bacia inclui o Grupo Paranoá, predominante nas áreas mais preservadas, com rochas como Metassilito na chapada do Pipiripau e Quartzito médio nos domos. A rede de drenagem principal da bacia é formada pelos rios Pipiripau e Mestre d'Armas, que se encontram próximos a Planaltina- DF, e percorrem aproximadamente 180 km até desaguardarem no Rio Corumbá (SENA-SOUZA *et al.*, 2013).

A Área de Proteção de Manancial (APM) do Pipiripau, conforme ilustrado na figura 6, abrange uma área de 16.435,44 hectares e possui um perímetro de 65,2 quilômetros.

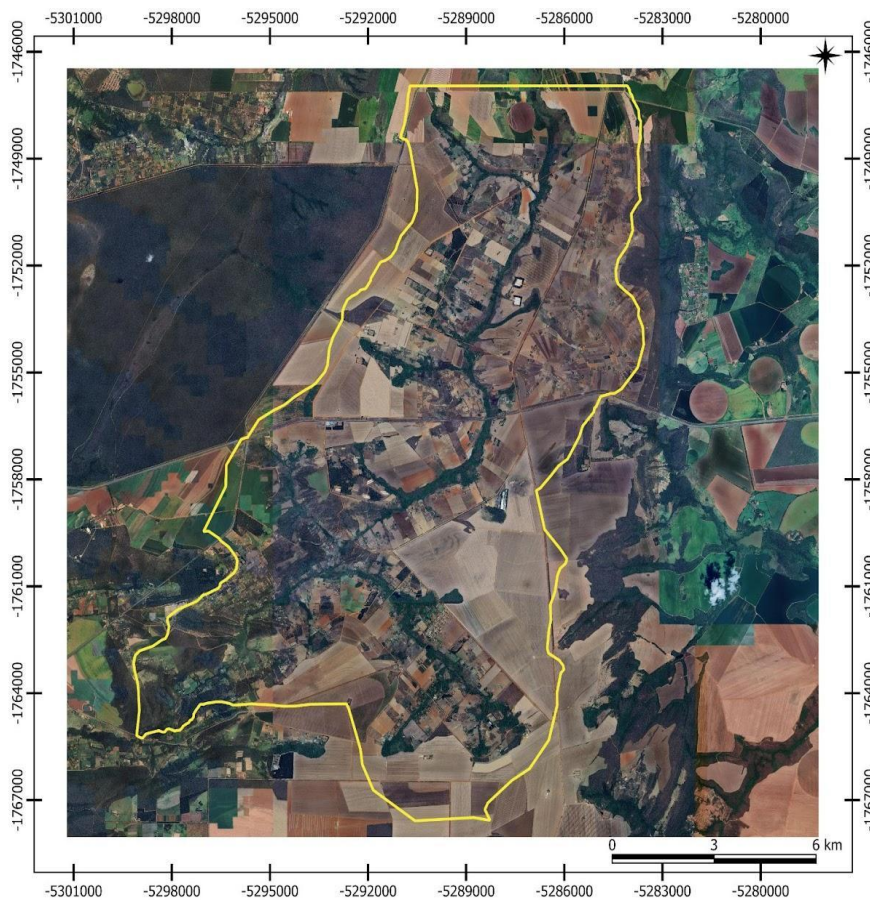


Figura 6. Área da APM Pipiripau (delimitada em amarelo) no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)

Localizada na Região Hidrográfica do Rio Paraná, pertencente à Bacia Hidrográfica do Rio São Bartolomeu, a APM integra a Unidade Hidrográfica - UH 38 do Rio Pipiripau. Do ponto de vista administrativo, encontra-se na Região de Planaltina, inserida na Macrozona Rural do Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT), mais especificamente na Zona Rural de Uso Controlado (IPEDF, 2023).

3.2 Obtenção de dados

Na figura 7, está representado um fluxograma esquemático da metodologia utilizada neste estudo para a classificação do uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Pipiripau. O processo inclui a obtenção de imagens de satélite Sentinel-2, a seleção de amostras representativas no Google Earth, a aplicação do algoritmo Gradient Boosting no Google Earth Engine para classificação supervisionada e a validação dos resultados por meio de uma matriz de confusão. Além disso, os dados classificados foram integrados no QGIS para análise

espacial, permitindo a avaliação do potencial de infiltração do solo com base em características pedológicas e geomorfológicas.

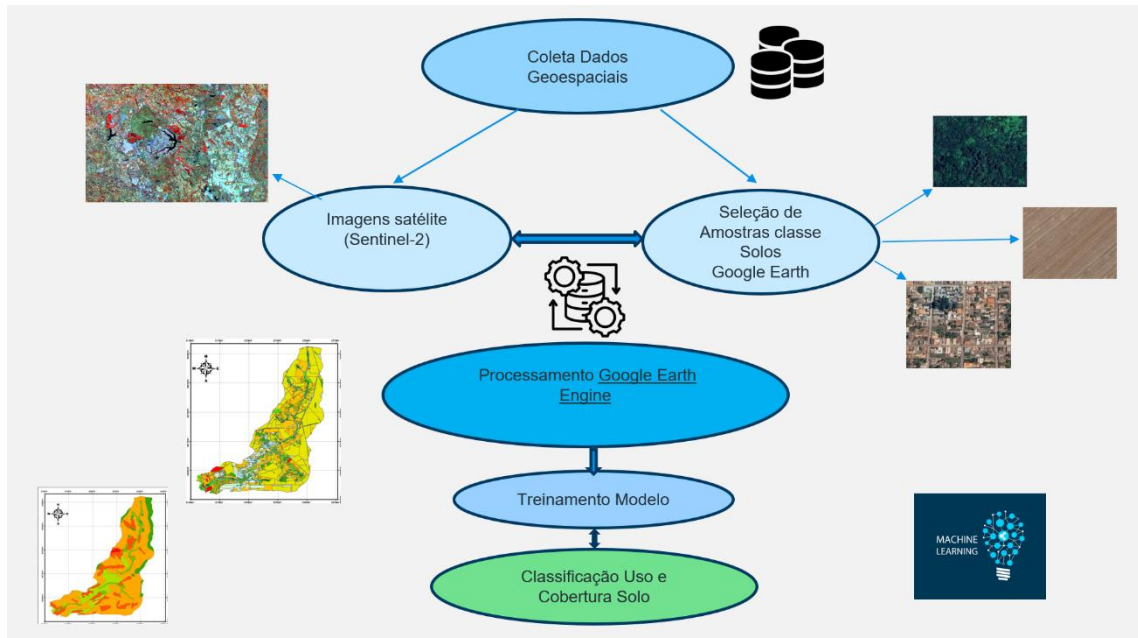


Figura 7. Fluxograma esquemático da classificação do uso e cobertura do solo. Fonte: Autora (2024)

3.2.1 Seleção de amostras de campo e classificação supervisionada







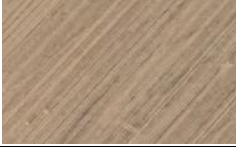
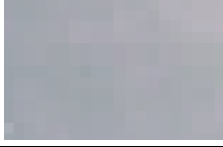

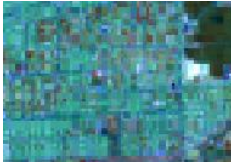




Para a elaboração do mapa de uso e ocupação do solo da Bacia do Pipiripau, foi utilizada a abordagem de classificação supervisionada, que requer o conhecimento prévio das classes de interesse para orientar a categorização das imagens de satélite. Inicialmente, amostras representativas foram selecionadas utilizando o Google Earth, a fim de delimitar os pontos geográficos relacionados ao tipo de uso do solo.

As amostras foram coletadas em diferentes pontos da bacia e classificadas em sete classes: vegetação nativa, florestas, pastagens, áreas agrícolas, áreas urbanas, solo exposto e corpos d'água. Esses pontos foram exportados em formatos KML e CSV, permitindo a integração com o Google Earth Engine (GEE) para o treinamento de algoritmos de aprendizado de máquina.

A classificação supervisionada difere da não supervisionada por exigir um processo de treinamento controlado pelo analista, que define previamente as classes de interesse e utiliza amostras específicas para orientar o algoritmo, conforme o Quadro 1. Pequenas regiões da imagem, formadas por centenas de pixels, são selecionadas para representar, de forma espectral,

as características dos diferentes tipos de uso e ocupação do solo. A identificação dessas áreas pode ser realizada com o suporte de dados de campo ou de mapas de referência (MENESES; ALMEIDA, 2012).

Quadro 1. Referência da classificação do uso do solo.

Tipo de Uso do Solo	Amostras Classificação Solo	Imagem RGB- Colorida
Vegetação nativa		
Florestas		
Pastagens		
Áreas agrícolas		
Áreas urbanas		
Solo exposto		
Corpos d'água		

Fonte: Adaptado de Meneses (2012).

3.2.2 Aplicação do Gradient Boosting na classificação de uso e ocupação do solo

O Gradient Boosting é um algoritmo de aprendizado supervisionado amplamente utilizado para classificação e regressão. Esse método constrói modelos preditivos fortes a partir da combinação sequencial de modelos fracos, geralmente árvores de decisão, corrigindo iterativamente os erros residuais (FRIEDMAN, 2001). No contexto da bacia do Ribeirão Pipiripau, o Gradient Boosting foi aplicado no Google Earth Engine (GEE) para classificar o uso e ocupação do solo com base em imagens do satélite Sentinel-2. Essa abordagem permite uma melhoria contínua na precisão das predições, tornando o Gradient Boosting uma das técnicas mais eficazes para problemas complexos de classificação (CHEN; GUESTRIN, 2016).

O processo consistiu na utilização de bandas espectrais (B2, B3, B4, B8) e índices como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), associados a amostras de classes de solo predefinidas (água, floresta, solo exposto...) para treinar o modelo. O algoritmo ajustou sucessivas árvores de decisão para minimizar o erro entre as classes reais e as predições. Após o treinamento, o modelo foi aplicado para classificar cada pixel da imagem, atribuindo uma classe específica a partir da combinação ponderada das árvores geradas.

3.2.3 Imagens de satélite

As imagens de satélite utilizadas neste estudo foram adquiridas diretamente do banco de dados do Google Earth Engine (GEE), especificamente da coleção de imagens multiespectrais do Sentinel-2. Essas imagens possuem resolução espacial de 10 metros, sendo amplamente utilizadas para estudos ambientais em escalas regionais e locais devido à sua alta frequência de revisita e qualidade espectral. Por exemplo, Venter e Sydenham (2021) destacam que o Sentinel-2 oferece uma resolução espacial de 10 m em bandas visíveis e no infravermelho próximo, tornando-o adequado para mapeamento detalhado do uso e cobertura do solo. Além disso, para garantir a qualidade dos dados e minimizar interferências atmosféricas, foi adotado um critério de cobertura máxima de nuvens de 10%, assegurando a seleção de imagens mais representativas da área de estudo. Dessa forma, a classificação foi realizada com base em 23 imagens do Sentinel-2, adquiridas entre janeiro e maio de 2024.

No que diz respeito ao recorte espacial, o arquivo vetorial do perímetro da Bacia do Pipiripau foi importado para o GEE e utilizado para delimitar a área de interesse de forma precisa. Essa abordagem permite maior rigor na análise espacial, garantindo que apenas os pixels pertencentes à bacia sejam processados. Quanto às bandas espectrais, foram empregadas

as seguintes faixas do espectro eletromagnético, reconhecidas por sua eficácia na classificação de uso e cobertura da terra:

- **B2:** Azul (490 nm) – útil para a diferenciação de corpos d'água e vegetação saudável.
- **B3:** Verde (560 nm) – amplamente empregada para a identificação de vegetação vigorosa.
- **B4:** Vermelho (665 nm) – essencial para a detecção de biomassa vegetal e áreas desmatadas.
- **B8:** Infravermelho próximo (842 nm) – fundamental para a análise da biomassa e da saúde da vegetação, pois as folhas das plantas refletem fortemente essa radiação quando estão saudáveis.

Vale destacar que o uso do GEE permitiu o pré-processamento automatizado das imagens, incluindo a aplicação de máscaras de nuvens e a geração de um mosaico temporal por mediana espectral. Esse método possibilita a mitigação de ruídos provenientes de variações atmosféricas, garantindo maior confiabilidade nos resultados. Segundo Razzano *et al.* (2023), a integração de dados do Sentinel-1 e Sentinel-2 no GEE, combinada com algoritmos de aprendizado de máquina, melhora significativamente a precisão na classificação de superfícies terrestres.

Dessa maneira, a utilização do Google Earth Engine para o processamento e análise das imagens do Sentinel-2 se mostra uma abordagem eficaz para o mapeamento da cobertura e uso da terra na Bacia do Pípiripau. O uso do GEE possibilitou o pré-processamento automatizado das imagens, incluindo a aplicação de máscaras de nuvens e a geração de um mosaico temporal por mediana espectral, garantindo maior consistência nos resultados (GORELICK *et al.*, 2017).

3.2.4 Mapeamento e Potencial de Infiltração

Para a elaboração do mapa de potencial de recarga de aquíferos, adotou-se a metodologia proposta por Seraphim e Bezerra (2019) que faz referência ao *Caderno Técnico da Matriz Ecológica do ZEE-DF (2017)*, a qual foi adaptada para o presente estudo mediante a utilização do software QGIS. Esse procedimento consistiu na atribuição de valores de potencial de infiltração aos diferentes tipos de solo (Tabela 1) e compartimentos geomorfológicos (Tabela 2) do Distrito Federal, o que viabilizou a identificação das áreas com maior capacidade de recarga hídrica.

Tabela 1. Potencial de recarga dos tipos de solo do Distrito Federal.

Tipos de Solo	Características	Potencial de Recarga	Valor
Neossolos Quartzarênicos	Solos muito profundos (>200 cm) com alta condutividade hidráulica ($\sim 2,8 \times 10^{-4}$ m/s)	Muito alto	5
Latossolos Vermelho; Vermelho-Amarelo	Solos muito profundos (>200 cm) com condutividade de $1,7 \times 10^{-5}$ a 10^{-6} m/s	Alto	4
Argissolos Vermelhos; Nitossolos Vermelhos	Solos profundos (100-200 cm) com condutividade de 10^{-5} a 10^{-6} m/s	Moderado	3
Plintossolos Pétricos, Gleissolo Háplico; Neossolo Flúvico	Solos pouco profundos (50-100 cm) com condutividade de $2,3 \times 10^{-6}$ a $1,4 \times 10^{-7}$ m/s	Baixo	2
Cambissolo Háplico; Neossolo Litólico	Solos rasos (0-200 cm) com condutividade entre 10^{-7} e 10^{-8} m/s	Muito Baixo	1

Fonte: Seraphim e Bezerra (2019)

Tabela 2. Potencial de recarga dos compartimentos geomorfológicos do Distrito Federal.

Geomorfologia	Características	Potencial de Recarga	Valor
Planos Elevados	Declividades inferiores a 10% e cotas superiores a 1.100 m	Muito alto	5
Planos Intermediários	Declividades inferiores a 12% e cotas entre 950 e 1050 m	Alto	4
Rebordos	Declividades entre 10% e 20% cota entre 950 m e 1.110 m	Moderado	3
Vales Dissecados	Declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800 m	Baixo	2
Rampas Íngremes	Declividades superior a 25 % cotas com altitude entre 800 m e 1.100 m	Muito Baixo	1

Fonte: Seraphim e Bezerra (2019)

No que se refere aos critérios analíticos, consideraram-se fatores físicos determinantes para a definição das zonas potenciais de recarga, tais como a declividade, a altitude e a condutividade hidráulica dos solos (TENENWURCEL, 2021; ALVARENGA *et al.*, 2012). A integração desses critérios foi realizada por meio da sobreposição de mapas temáticos no QGIS, aplicando-se uma média ponderada para equilibrar a influência das variáveis.

De acordo com Vasconcelos *et al.* (2013), as características pedológicas, geomorfológicas e geológicas desempenham um papel fundamental na identificação de áreas propícias à recarga de aquíferos. Nesse sentido, a geomorfologia exerce influência direta sobre o regime hídrico das bacias hidrográficas. Por exemplo, bacias com relevo mais suave apresentam menores coeficientes de recessão, o que favorece a infiltração da água no solo e incrementa os volumes de fluxo de base, assegurando, assim, maior disponibilidade hídrica, sobretudo durante o período de estiagem. Ademais, nessas áreas, solos mais espessos prolongam o tempo de trânsito da água subterrânea, possibilitando maior interação com os minerais do solo e elevando a condutividade elétrica (MONTEIRO; BACELLAR, 2014).

Conforme preconizado na metodologia de Seraphim e Bezerra (2019), atribuíram-se valores de referência ao potencial de recarga, tomando-se como base as compartimentações geomorfológicas e os tipos de solo, em uma escala de 1 a 5, conforme detalhado nas Tabelas 1 e 2.

Nessa ponderação, atribuiu-se peso 2 (Equação 1), aos tipos de solo devido à sua relevância na recarga de aquíferos, conforme descrito no *Manual Técnico de Pedologia* do IBGE (2015). Características morfológicas do solo, como granulometria, estrutura e consistência, influenciam diretamente sua permeabilidade, determinando a capacidade de conduzir e armazenar água. Esses atributos foram essenciais para a identificação das áreas com maior potencial de recarga hídrica, conforme evidenciado por estudos anteriores (LOUSADA; CAMPOS, 2005; SANTOS; KOIDE, 2016).

A equação aplicada para o cálculo do potencial de recarga foi:

$$Pr = \frac{Gr + 2Sr}{3}$$

(1)

Onde:

Pr = Potencial de recarga dos aquíferos;

Sr = Valores atribuídos aos tipos de solo;

Gr = Valores atribuídos às compartimentações geomorfológicas;

Para elaboração do Mapa de Potencial de Infiltração foi baseada na integração de dois mapas temáticos: o mapa geomorfológico (Figura 8) e o mapa de solos (Figura 9). A sobreposição dessas informações permitiu identificar as áreas mais vulneráveis à recarga hídrica, uma vez que tanto os tipos de solo quanto às características geomorfológicas influenciam diretamente a capacidade de infiltração da água no solo.

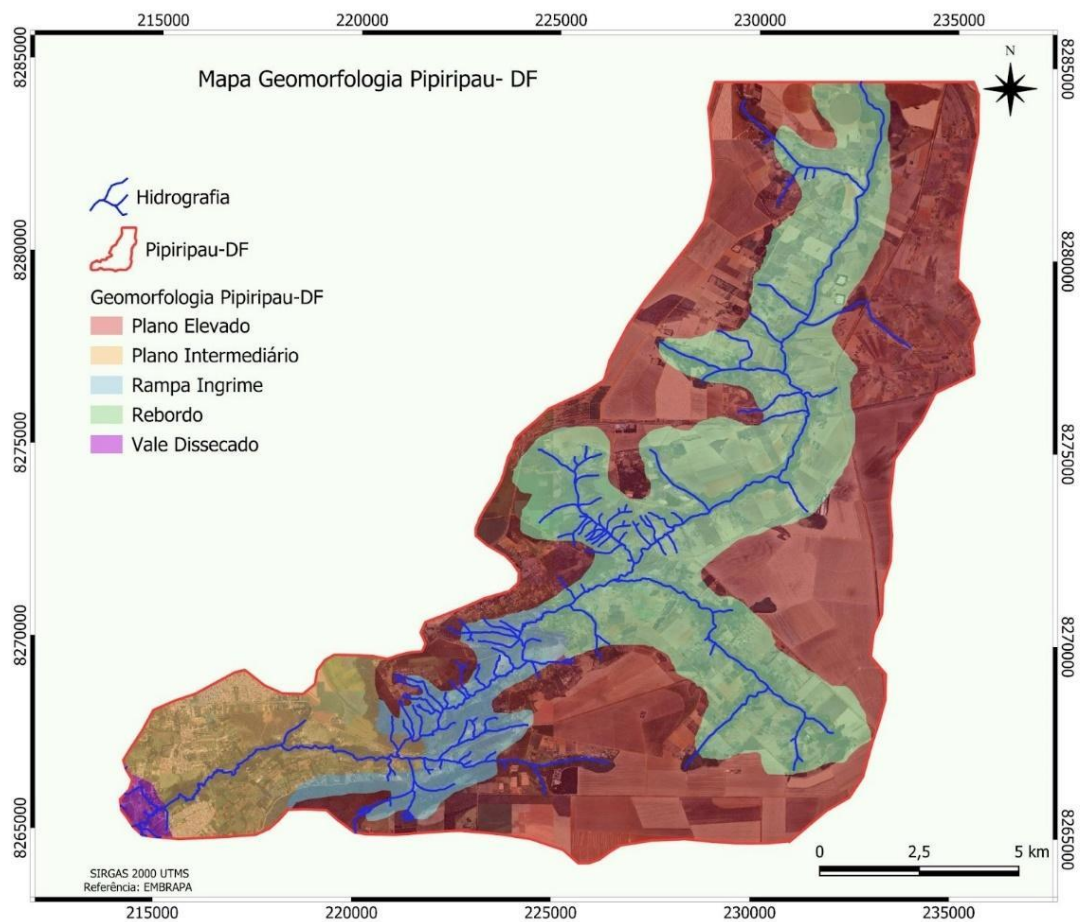


Figura 8. Mapa da geomorfologia da bacia do Ribeirão Pipiripau no Distrito Federal. Fonte: Embrapa

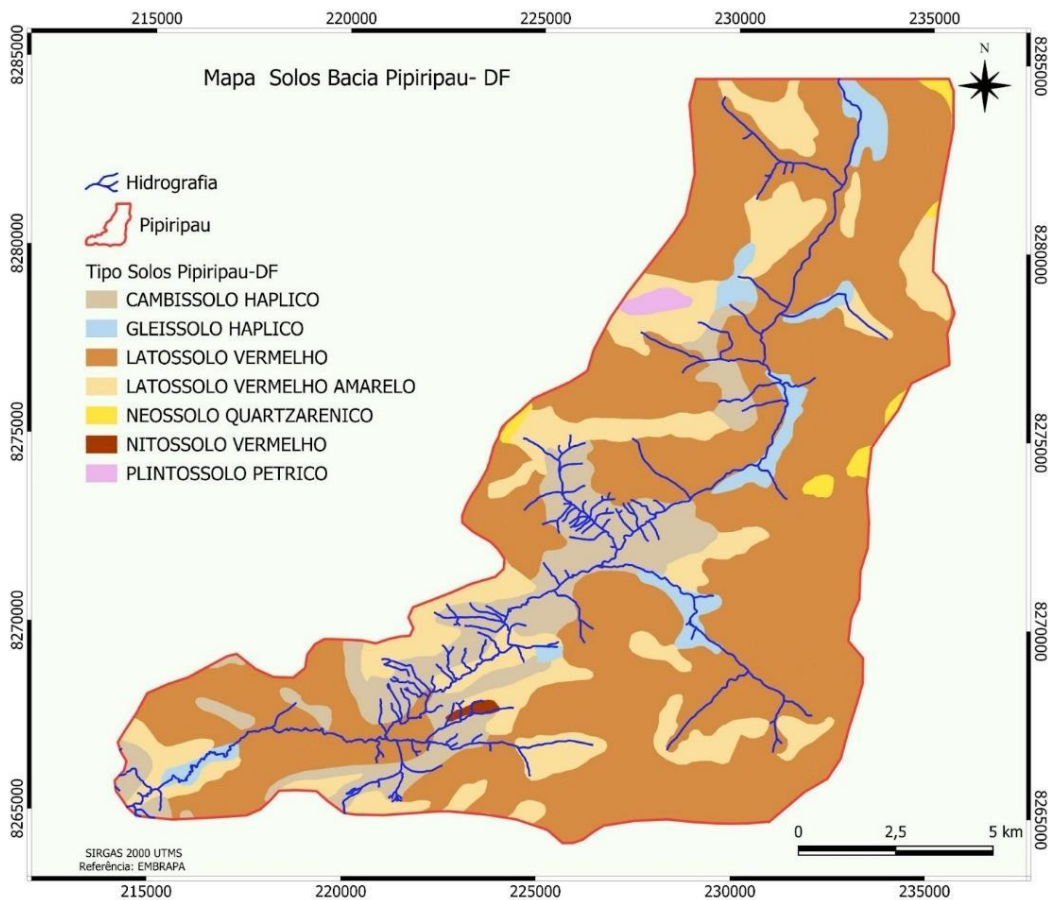


Figura 9. Mapa de solos da bacia do Ribeirão Pipiripau no Distrito Federal. Fonte: Embrapa

3.2.5 Classificação do potencial de recarga

Para classificar o potencial de recarga, foi utilizada a técnica de Discretização por Largura Igual, que consiste em dividir o intervalo de valores em classes com a mesma amplitude, facilitando a interpretação dos resultados. Essa técnica permitiu uma representação uniforme dos dados, destacando as áreas com diferentes níveis de potencial de recarga.

Intervalos de classificação utilizados:

- **Muito Baixo Potencial:** 1.000 a 1.800
- **Baixo Potencial:** 1.801 a 2.600
- **Moderado Potencial:** 2.601 a 3.400
- **Alto Potencial:** 3.401 a 4.200

- **Muito Alto Potencial:** 4.201 a 5.000

Entre as principais vantagens dessa técnica, destacam-se a simplicidade de implementação e a facilidade de interpretação, tornando o processo de classificação mais acessível e objetivo. No entanto, uma das limitações é que essa técnica pode não representar adequadamente distribuições de dados altamente assimétricos, pois não considera a frequência dos valores dentro de cada intervalo.

A análise espacial foi realizada no software QGIS, permitindo a sobreposição de mapas (Figura 8 e 9) e o cálculo do potencial de recarga. A principal vantagem dessa abordagem também é a simplicidade de implementação e a facilidade de interpretação, no entanto, a técnica pode não refletir com precisão distribuições de dados assimétricos.

Após a obtenção dos dados de potencial de recarga, as informações foram cruzadas com os tipos de uso do solo da bacia com o objetivo de identificar as áreas sensíveis conforme seu uso. Esse processo permitiu apontar regiões prioritárias para ações de conservação e prevenção da perda de vegetação nativa, que podem gerar impactos qualitativos e quantitativos nos pontos de captação das Áreas de Proteção de Mananciais (APMs).

Para essa análise, foi feita a seleção das feições com alto e muito alto potencial de recarga. Assim, foi possível destacar no mapa as áreas mais vulneráveis e estratégicas para a conservação dos recursos hídricos conforme seu uso do solo. Essa análise permite destacar áreas críticas de impermeabilidade que podem comprometer a infiltração da água e aumentar o escoamento superficial, o que é fundamental para a prevenção de problemas como erosão e inundações (CONGALTON; GREEN, 2019).

3.3 Análise estatística

A análise estatística foi realizada para avaliar a precisão da classificação do uso e ocupação do solo. O modelo foi treinado com 70% das amostras de dados coletadas via Amostra Estratificada e validado com os 30% restantes, totalizando 2.082 amostras para treinamento e 881 para validação.

Para medir a qualidade da classificação, foi aplicada a Matriz de Confusão, que compara os valores preditos pelo modelo com os dados de referência, permitindo a identificação de erros de omissão e comissão. Segundo Prina e Trentin (2015), a Matriz de Confusão é uma ferramenta essencial para validar a acurácia de classificações supervisionadas de imagens de satélite. Essa matriz organiza os dados de referência e os valores classificados, permitindo

analisar a confiabilidade do modelo de classificação por meio de estatísticas como índice Kappa, acurácia global e exatidão das classes.

A partir dessa matriz, foram calculadas métricas essenciais para avaliar o desempenho do modelo, incluindo a acurácia global (Equação 2), que representa a porcentagem de amostras corretamente classificadas em relação ao total de amostras avaliadas.

$$Ag = \frac{\sum_{i=1}^n C_{ii}}{N}$$

(2)

Onde:

Ag = Acurácia Global;

C_{ii} = Elementos Diagonal da Matriz de Confusão;

N = Número total de amostras;

Já o Índice Kappa (Equação 3), mede a concordância entre a classificação do modelo e os dados de referência, levando em consideração a concordância esperada pelo acaso.

$$\kappa = \frac{Po - Pe}{1 - Pe}$$

(3)

Onde:

Po = Acurácia observada (soma dos acertos na diagonal principal dividido pelo total de amostras);

Pe = Acurácia esperada pelo acaso, calculada como:

$$Pe = \sum_{i=1}^n \left(\frac{R_i \times C_i}{N^2} \right)$$

(4)

R_i = Total de amostras reais na classe i ;

C_i = Total de amostras classificadas na classe i ;

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fragmentação de habitats

O avanço das atividades agrícolas tem resultado na conversão acelerada de áreas naturais em zonas de cultivo, conforme identificado no mapa de uso do solo (Figura 10). Esse processo desordenado provoca a fragmentação dos habitats naturais, sendo intensificado pelo desmatamento e pela expansão de áreas urbanas, pastagens e plantações comerciais. Oliveira *et al.* (2014), ao analisarem a fragmentação da paisagem na Bacia Hidrográfica do Alto São Bartolomeu, observaram que o acelerado processo de ocupação agrícola e urbana tem gerado intensa pressão sobre os remanescentes naturais, especialmente em áreas de proteção ambiental, comprometendo sua capacidade ecológica e aumentando o risco de perda de biodiversidade local. Os autores destacaram que a fragmentação ocorre com maior intensidade em áreas naturais de vegetação nativa, especialmente nas formações florestais associadas às Matas de Galeria. Essas áreas são fundamentais para a proteção dos cursos d'água e a preservação da biodiversidade.

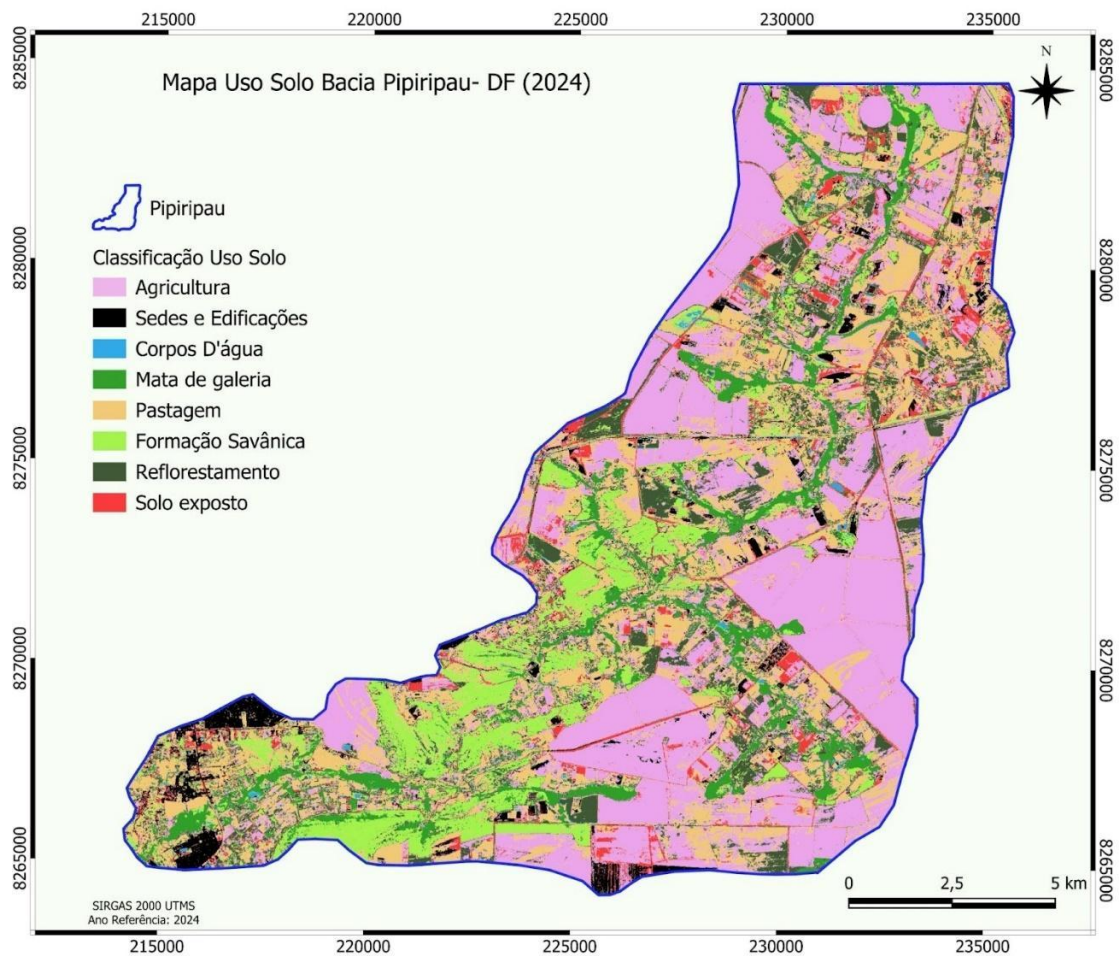


Figura 10. Mapa do uso solo da bacia do Pipiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)

A fragmentação desses ambientes reduz a conectividade ecológica, dificultando o deslocamento da fauna e comprometendo processos fundamentais, como a dispersão de sementes, o que resulta na diminuição da diversidade biológica e na degradação dos serviços ecossistêmicos (HADDAD *et al.*, 2015). Strassburg *et al.* (2017) alertam que a contínua conversão do Cerrado para uso agrícola coloca em risco sua biodiversidade única e os serviços ecossistêmicos que sustenta.

Além disso, o efeito de borda, resultante da fragmentação, altera as condições microclimáticas nas margens dos fragmentos florestais, afetando negativamente a fauna e a flora locais. Laurance; Vasconcelos e Lovejoy (2000) observaram que as bordas florestais experimentam mudanças ambientais que podem levar à perda de espécies e à invasão por espécies generalistas.

Outro impacto significativo da fragmentação é a perda de conectividade entre os fragmentos florestais, resultando na defaunação, ou seja, na diminuição da riqueza e diversidade de espécies animais. Dirzo *et al.* (2014) enfatizam que a defaunação em florestas tropicais pode comprometer funções ecológicas críticas, como a dispersão de sementes e o controle de populações de insetos.

No caso específico da Bacia do Pípiripau, há forte pressão de ocupação para uso agrícola. Entretanto, no documento do Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF) (2017), há sugestão que essa região não seja ocupada, uma vez que se trata de uma importante zona de recarga dos aquíferos. Portanto, a conservação dessa área é fundamental para garantir a sustentabilidade hídrica e ecológica da região.

A proximidade da bacia do Ribeirão Pípiripau com a Estação Ecológica de Águas Emendadas (ESECAE) reforça a importância da conservação dessa área (Figura 11). A ESECAE é fundamental para a proteção da biodiversidade do bioma Cerrado, abrigando espécies endêmicas e ameaçadas de extinção e nascentes essenciais para abastecimento hídrico do DF e Goiás. Segundo o *Plano de Manejo da Estação Ecológica de Águas Emendadas* (IBRAM, 2009), as rodovias que circundam a unidade de conservação representam um obstáculo significativo para a fauna silvestre, dificultando a formação de corredores ecológicos essenciais para o deslocamento dos animais e a recolonização de áreas agrícolas.



Figura 11. Mapa Localização Estação Ecológica Águas Emendadas. Fonte: Autora (2024)

Diante desse cenário, estratégias como a implementação de corredores ecológicos são essenciais, pois permitem a reconexão entre fragmentos florestais, facilitando o deslocamento das espécies e a manutenção da diversidade genética (RODRIGUES; NASCIMENTO, 2006). Além disso, políticas públicas voltadas para a restauração de paisagens degradadas e o manejo sustentável do solo são fundamentais para minimizar os efeitos da fragmentação (RAMBALDI; OLIVEIRA, 2003).

Esses desafios são ilustrados pela análise do uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Pipiripau (Tabela 3), que revela uma significativa redução da vegetação nativa. A agricultura ocupa 34,3% da área total da bacia (7.245,67 hectares), seguida por pastagens (24,77% ou 5.232,24 hectares) e áreas de reflorestamento, predominantemente compostas por monoculturas de espécies madeireiras para exploração comercial (14,42% ou 3.045,58 hectares). Esse cenário indica que a bacia perdeu mais de 70% de sua cobertura vegetal original, evidenciando a urgência de ações de conservação e restauração para reverter os impactos da fragmentação e garantir a sustentabilidade ecológica da região.

Tabela 3. Uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal.

Uso do Solo	Área (ha)	Porcentagem (%)
Agricultura	7.245,67	34,30
Pastagem	5.232,24	24,77
Reflorestamento	3.045,58	14,42
Formação savânica	2.195,33	10,39
Solo exposto	1.228,57	5,82
Mata de Galeria	1.221,76	5,78
Sedes e edificações	822,65	3,89
Corpos d'água	132,00	0,60
Área Total	21.123,53	100

Fonte: Autora (2024)

De acordo com o *Plano de Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau*, aproximadamente 31% da área da bacia estava coberta por vegetação nativa no ano de 2000 (CAESB, 2001). No entanto, a expansão das atividades agropecuárias tem impactado significativamente a região. Chaves e Piau (2008) destacam que as áreas destinadas à agricultura e pastagens correspondem a 43% e 28% da bacia, respectivamente. Essas atividades, devido à ausência de práticas conservacionistas, são apontadas como as principais responsáveis pelo assoreamento do Ribeirão Pípiripau.

Essa situação é corroborada por um estudo publicado pela Emater-DF, em conjunto com a The Nature Conservancy (TNC), no âmbito do *Relatório de Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Ribeirão Pípiripau*. O estudo revela que a cobertura de vegetação nativa na bacia reduziu-se para 25% em 2010, em comparação com os 31% registrados em 2000. Essa redução está diretamente relacionada ao avanço das atividades agropecuárias, que ocupam mais de 60% da área da bacia, conforme indica o mesmo relatório (ANA, 2010).

Esse cenário evidencia a necessidade de ações como o *Projeto Produtor de Águas*, que devem ser incentivadas na região, uma vez que a bacia continua com forte predomínio agrícola e redução da vegetação remanescente. Destaca-se a presença de pastagens degradadas e áreas de reflorestamento com monoculturas de espécies madeireiras, um cenário semelhante ao identificado atualmente. Além disso, a baixa representatividade de áreas de Mata de Galeria (5,8%) e de corpos d'água (0,62%), conforme apontam os dados da Tabela 3, reforça a urgência de ações voltadas à recomposição da vegetação nativa e ao controle do solo exposto, que contribui para o assoreamento dos corpos hídricos.

A situação também se agrava diante do crescimento alarmante do desmatamento no Distrito Federal, que registrou um aumento de 612,5% em 2023, totalizando 638 hectares desmatados. Esse avanço está diretamente relacionado à grilagem de terras e à especulação imobiliária, fatores que intensificam a degradação do bioma Cerrado (ARAÚJO, 2024).

Nesse sentido, cabe ressaltar que não foram encontrados trabalhos recentes de mapeamento de uso do solo específicos para a bacia do Ribeirão Pípiripau. Além disso, as metodologias utilizadas pela Emater-DF na classificação do uso do solo podem diferir das empregadas em outros estudos, o que pode influenciar na categorização e nos resultados obtidos. No entanto, apesar das diferenças metodológicas, os dados disponíveis indicam um cenário consistente de perda de vegetação remanescente e expansão das atividades agrícolas na bacia.

4.2 Desempenho Modelo de Classificação

A avaliação do desempenho do modelo de classificação de uso e ocupação do solo foi realizada por meio da matriz de confusão (Figura 12), que indicou uma acurácia geral de 90% e um índice Kappa de 0,89. Esses resultados demonstram a eficácia do algoritmo Gradient Boosting na distinção das diferentes classes.

O índice Kappa é uma métrica amplamente utilizada para avaliar a concordância entre a classificação realizada e os dados de referência, corrigindo a concordância que ocorre ao acaso.

A matriz de confusão permite identificar os acertos e erros do modelo em cada classe, facilitando a análise da qualidade da classificação e indicando quais classes apresentam maior dificuldade de distinção. Por exemplo, em estudo realizado por Nunes e Roig (2014), ao analisar o uso e ocupação do solo da bacia do Alto Descoberto, no Distrito Federal, utilizando classificação automática baseada em regras e lógica nebulosa, foi obtido um índice Kappa de 0,64, considerado de "concordância substancial". Comparativamente, o índice de 0,89 alcançado pelo modelo Gradient Boosting neste estudo destaca sua superioridade na classificação temática.

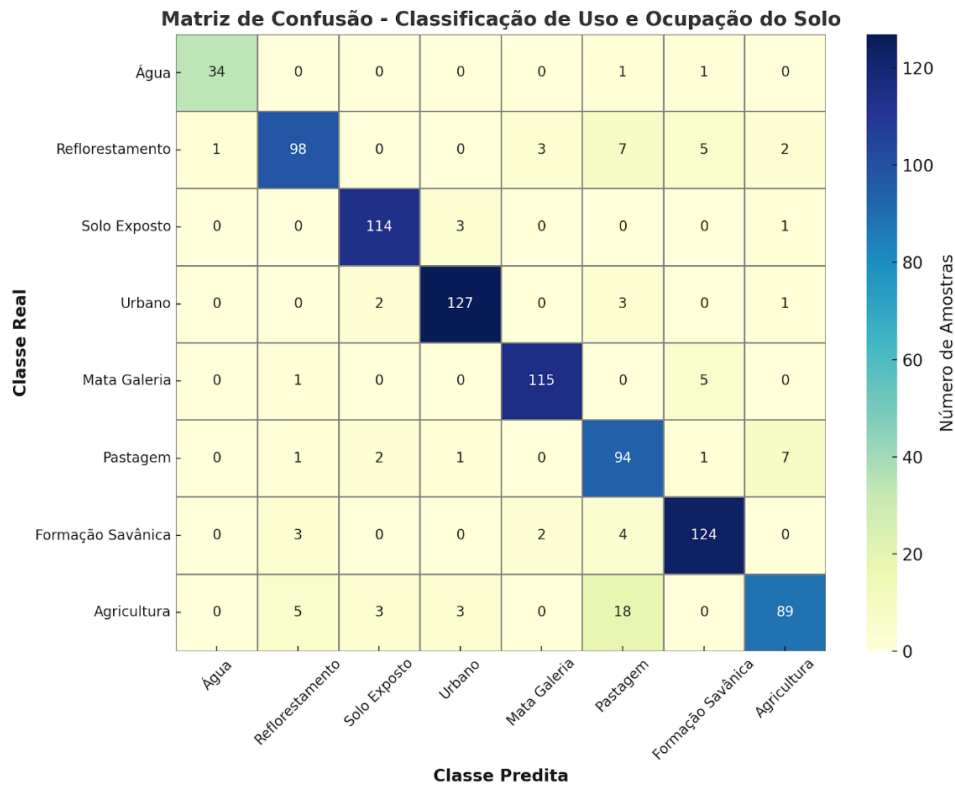


Figura 12. Matriz de confusão para amostras de classificação de solos.

A matriz de confusão apresentada na figura 12, ilustra o desempenho do modelo de classificação para diferentes classes de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Pipiripau. As linhas representam as classes reais, enquanto as colunas mostram as classes preditas pelo modelo.

Interpretação dos Resultados:

- **Água (Classe 0):**
 - 34 acertos e 2 erros, com pequena confusão com as classes Pastagem (5) e Formação Savânica (6).
 - O modelo apresenta alta precisão nessa classe.
- **Reflorestamento (Classe 1):**
 - 98 acertos, mas com 18 erros, principalmente confundidos com Mata de Galeria (4), Pastagem (5) e Agricultura (7).
 - Isso pode ocorrer devido à similaridade espectral entre áreas reflorestadas e vegetações naturais ou manejadas.
- **Solo Exposto (Classe 2):**
 - 114 acertos, com erros mínimos, principalmente confundido com Urbano (3).
 - A classificação dessa classe foi bastante eficaz.

- Urbano (Classe 3):
 - 127 acertos, com pequenos erros, especialmente com Solo Exposto (2) e Pastagem (5).
 - Indica bom desempenho na identificação de áreas urbanizadas.
- Mata de Galeria (Classe 4):
 - 115 acertos, com pequenas confusões com Pastagem (5).
 - Isso demonstra a necessidade de melhorar a separação espectral entre essas classes.
- Pastagem (Classe 5):
 - 94 acertos, com 14 erros, sendo os principais com Mata de Galeria (4) e Agricultura (7).
 - A sobreposição entre vegetações pode dificultar a classificação precisa.
- Formação Savânica (Classe 6):
 - 124 acertos, com pequenos erros, especialmente com Pastagem (5).
 - O modelo teve ótimo desempenho para essa classe.
- Agricultura (Classe 7):
 - 89 acertos, com 21 erros, confundindo-se principalmente com Pastagem (5) e Reflorestamento (1).
 - A semelhança entre práticas agrícolas e pastagens justifica essa dificuldade.

Segundo Landis e Koch (1977), valores de Kappa acima de 0,81 indicam uma concordância "excelente". Portanto, o valor de 0,89 obtido neste estudo evidencia a alta precisão do modelo na classificação das classes de uso e ocupação do solo. As maiores dificuldades ocorreram na diferenciação entre Pastagem e Agricultura, o que indica a necessidade de ajustes, como o balanceamento das amostras ou o uso de índices espectrais mais específicos.

4.3 Mapa de potencial de infiltração na bacia do Ribeirão Pipiripau

O Mapa de Potencial de Infiltração da Bacia do Ribeirão Pipiripau (Figura 13) foi elaborado a partir da integração do mapa geomorfológico (Figura 8) e do mapa de solos (Figura 9). A sobreposição dessas informações permitiu identificar as áreas com maior e menor potencial de infiltração, considerando a influência do tipo de solo e das características geomorfológicas na absorção e armazenamento da água (LIMA; SILANS, 1999).

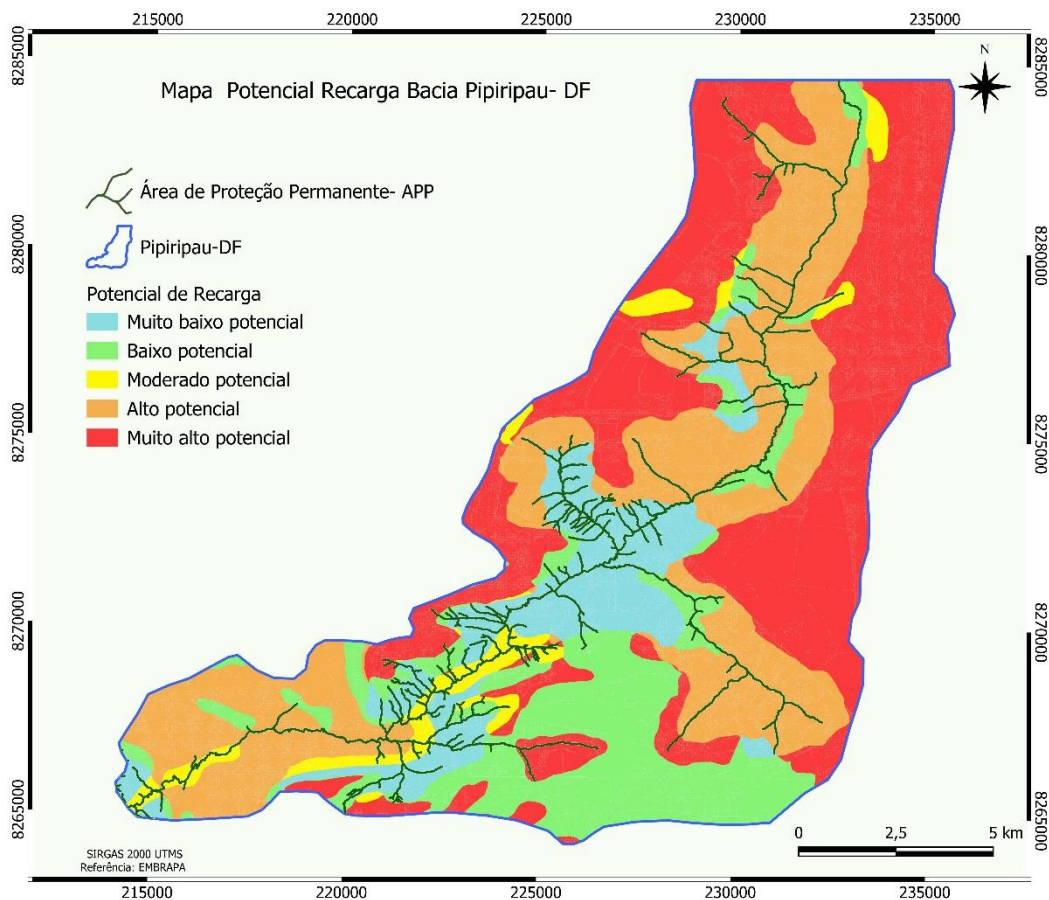


Figura 13. Mapa do potencial de recarga da bacia do Ribeirão Pipiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)

Pelo mapa (Figura 13), é possível identificar que os pontos mais sensíveis à infiltração estão localizados, principalmente, na borda da bacia, em áreas próximas a estradas asfaltadas e em regiões sob exploração agrícola extensiva. Nessas áreas, o solo está mais suscetível à compactação e contaminação por agrotóxicos, o que pode comprometer a qualidade da recarga hídrica e aumentar a pegada hídrica cinza. Segundo Martins *et al.*, (2021), o crescimento desordenado e as atividades antrópicas intensificam os impactos sobre os cursos d'água, reduzindo a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos. Já as áreas de preservação permanente (APPs) desempenham um papel essencial na manutenção da recarga hídrica, na proteção da biodiversidade e na mitigação dos impactos ambientais.

O gráfico da figura 14 indica que as classes de alto e muito alto potencial de infiltração correspondem a 67,02% da área total da bacia, abrangendo aproximadamente 14.095,54 hectares. Sabe-se que os solos do tipo Latossolos Vermelhos e Latossolos Vermelho-Amarelos possuem alta permeabilidade, favorecendo a infiltração e tornando as áreas de planalto

estratégicas para a recarga de aquíferos, o que contribui para a manutenção da disponibilidade hídrica na região (LIMOEIRO,2020).

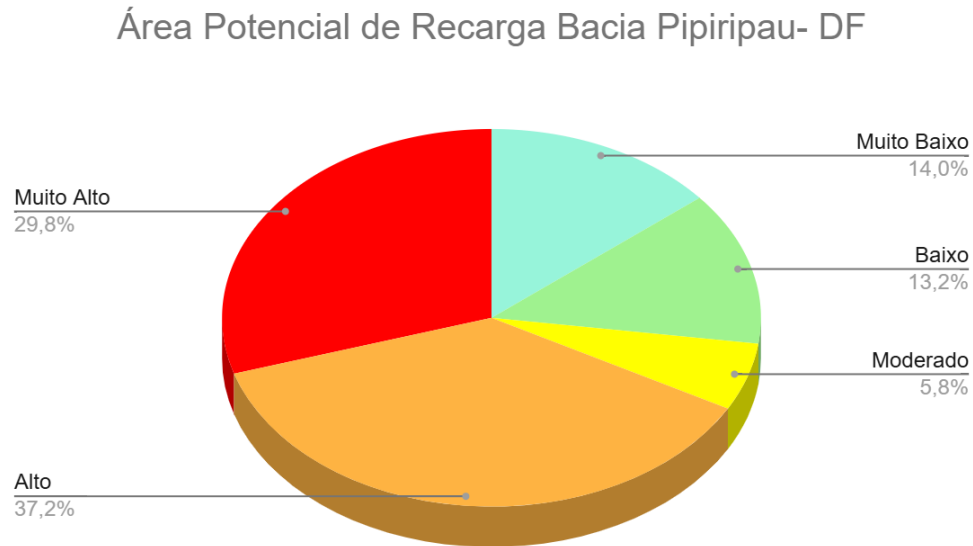


Figura 14. Gráfico do potencial de recarga da bacia do Ribeirão Pípiripau no Distrito Federal.
Fonte: Autora (2024)

A relação entre infiltração e características ambientais do Cerrado já foi amplamente discutida em estudos hidrológicos, que destacam a influência das propriedades físicas do solo, da geomorfologia e da ocupação do solo no processo de recarga dos aquíferos (SANTOS; KOIDE, 2016). Solos com maior condutividade hidráulica e relevo suave apresentam maior potencial de infiltração, enquanto solos compactados ou áreas com declividades acentuadas dificultam esse processo (MAIDMENT, 1993). Além disso, alterações no uso e cobertura do solo, associadas à extração excessiva de água, podem levar ao rebaixamento do lençol freático e à redução da vazão dos corpos hídricos superficiais (SERAPHIM; BEZERRA, 2019).

A cobertura vegetal também desempenha um papel fundamental no potencial de infiltração. Viana *et al.* (2016) demonstraram que áreas de mata nativa apresentam as maiores taxas de infiltração, devido à presença de raízes e microrganismos que melhoram a estrutura do solo. Em contrapartida, áreas com manejo intensivo, como o plantio convencional e pastagens, apresentam menor eficiência de infiltração devido à compactação do solo pelo tráfego de máquinas e pisoteio de animais (ZWIRTES *et al.*, 2011).

Esses fatores são claramente observados na Bacia do Pípiripau, onde a análise do mapa da figura 13, indica que as áreas com alto potencial de recarga hídrica estão concentradas na região sul, abrangendo as regiões de Arapoangas e Mestre d'Armas, em Planaltina-DF. No

entanto, essa região também apresenta elevado aporte de sedimentos e poluentes, comprometendo a qualidade da água a jusante e contribuindo para a impermeabilização do solo, o que reduz a recarga dos aquíferos.

De acordo com o *Caderno Técnico da Matriz Ecológica do ZEE-DF (2017)*, as taxas mais elevadas de recarga hídrica estão associadas a áreas com topografia plana e cobertura vegetal densa, além de aquíferos livres. Por outro lado, em regiões com relevo acidentado, ausência de vegetação ou práticas inadequadas de uso e ocupação do solo que intensificam o escoamento superficial, a recarga ocorre de maneira mais lenta e reduzida. No Distrito Federal, as áreas com maior vulnerabilidade à redução da recarga estão concentradas em zonas específicas, como um anel prioritário localizado na divisa da bacia do Rio Paranoá, a região entre Sobradinho e Planaltina, a sub-bacia do Pípiripau e a porção sudeste do vale do São Bartolomeu.

Nesse contexto, Oliveira (2020) destaca que a drenagem convencional utilizada na infraestrutura urbana acelera a remoção das águas pluviais, impedindo sua infiltração e comprometendo a segurança hídrica da região. Para mitigar esses impactos, o autor sugere a adoção de infraestrutura verde e técnicas de drenagem sustentável, que promovem maior infiltração e reduzem a vulnerabilidade hídrica, especialmente em áreas sensíveis à recarga dos aquíferos.

4.4 Impacto do uso e ocupação do solo APM Pípiripau-DF

Estudos hidrológicos destacam a importância da interação entre os fluxos de águas superficiais e subterrâneas para a gestão eficiente dos recursos hídricos. Na bacia do Ribeirão Pípiripau, o fluxo de base corresponde a 100% da vazão do rio nos períodos de estiagem, demonstrando a dependência do sistema hidrográfico local da água subterrânea (DEL REY; CUNHA, 2021). Assim, a gestão adequada da recarga dos aquíferos é essencial para garantir a sustentabilidade hídrica, especialmente durante os períodos de seca.

Outro fator preocupante é o uso intensivo de pivôs centrais e sistemas de irrigação, que têm agravado a pressão sobre os recursos hídricos da região (ADASA, 2019). Embora a infiltração de água no solo ainda ocorra, a qualidade desses recursos hídricos tem sido seriamente prejudicada pelo uso contínuo de defensivos agrícolas e agroquímicos, aumentando o risco de contaminação e impactando diretamente a biodiversidade e a saúde ambiental.

Conforme a Nota Técnica nº 05/2023 do Instituto de Pesquisa e Estatística do Distrito Federal (IPEDF), a Área de Proteção de Manancial (APM) Pípiripau apresentava, em 1985,

uma cobertura vegetal predominantemente composta por formações savânica (22,93%), seguida por pastagens (21,06%) e mosaico de usos (18,71%), características de áreas voltadas para a agropecuária. O estudo revelou ainda que, entre os anos de 1985 e 2021, houve um expressivo aumento de 28,33% nas áreas destinadas à agricultura, evidenciando a intensificação da exploração do solo para atividades produtivas.

Apesar das diretrizes de uso controlado estabelecidas pelo Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT), que visa equilibrar o desenvolvimento rural com a conservação ambiental, a implementação de medidas efetivas de recuperação ambiental enfrenta desafios significativos. A crescente pressão do setor agrícola dificulta a recomposição da vegetação nativa e a preservação das áreas de recarga hídrica.

A análise espacial da APM Pipiripau, apresentada na figura 15, revela a distribuição do uso e cobertura do solo, destacando as áreas mais impactadas e as regiões prioritárias para recuperação ambiental e conservação da vegetação nativa. O resultado indica que os pontos com maior potencial de recarga hídrica estão, em grande parte, ocupados por agricultura extensiva, o que agrava a vulnerabilidade do solo.

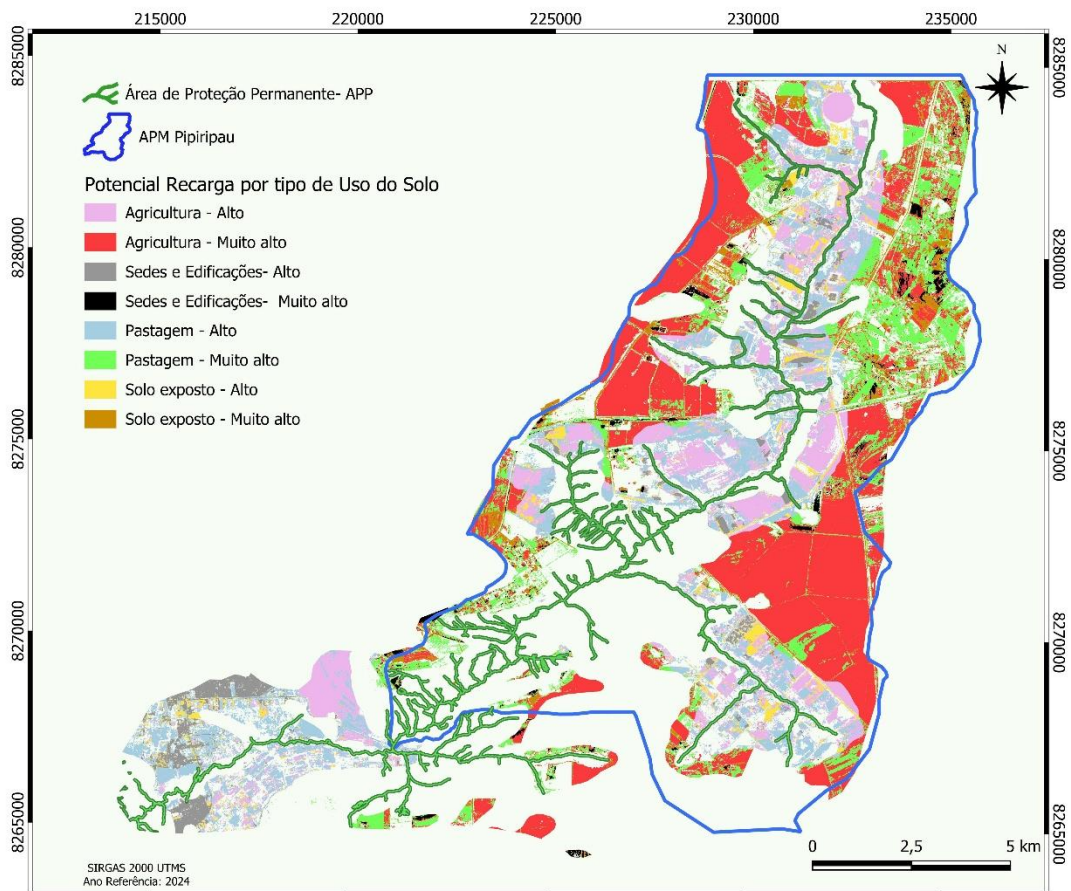


Figura 15. Mapa do potencial de recarga por tipo de uso do solo na bacia do Ribeirão Pipiripau no Distrito Federal. Fonte: Autora (2024)

Essas áreas são especialmente sensíveis ao escoamento superficial, que favorece a erosão e o transporte de sedimentos, além da infiltração de agrotóxicos utilizados com frequência por usuários da bacia. Esse cenário reforça a urgência de adotar práticas sustentáveis de manejo e conservação para proteger os recursos hídricos e garantir a integridade ambiental da região.

As alterações no uso e ocupação do solo de uma bacia hidrográfica impactam significativamente o escoamento superficial, influenciando diretamente o comportamento das enchentes, das vazões mínimas e da vazão média (TUCCI, 2005).

As áreas destacadas em vermelho representam regiões que demandam a adoção de métodos de plantio direto e técnicas agrícolas menos intensivas, com o objetivo de minimizar os impactos sobre a recarga dos aquíferos. Além disso, essas áreas são potencialmente adequadas para a recomposição da vegetação nativa e para a implantação do programa Produtor de Água, iniciativas que contribuem para a conservação dos recursos hídricos e a promoção de práticas agrícolas sustentáveis.

Embora as Áreas de Proteção de Mananciais (APMs) sejam consideradas zonas com limitações de ocupação e uso restrito, conforme estabelecido pelo Plano Diretor de Ordenamento Territorial (PDOT) e pela Portaria Conjunta nº 04, de 20 de outubro de 2020, que representa um importante instrumento para a proteção dos recursos hídricos e a garantia de água de qualidade para a população do Distrito Federal, alinhando-se aos princípios da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), é necessária uma atualização do estado atual dessas áreas. Isso inclui a fiscalização e a limitação das ocupações irregulares, que prejudicam a qualidade da água e afetam diretamente uma parcela significativa da população do DF.

Considerando o cenário futuro de expansão das atividades agrícolas e da urbanização na região de Planaltina- DF, a bacia do Pípiripau caminha para um cenário de escassez hídrica. Diante disso, é fundamental mapear as áreas mais sensíveis para a implementação de práticas conservacionistas nas zonas agrícolas, que interferem diretamente na disponibilidade hídrica da bacia e podem comprometer a qualidade da água ofertada à população local.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que o uso e a ocupação do solo na bacia do Ribeirão Pípiripau têm impactado diretamente a Área de Proteção de Manancial (APM)

Pipiripau, comprometendo a sustentabilidade dos recursos hídricos da região. A expansão desordenada das atividades agrícolas, o uso intensivo de sistemas de irrigação e a fragmentação da vegetação nativa representam riscos significativos, contribuindo para o aumento do escoamento superficial, da erosão do solo e da contaminação dos corpos hídricos.

A análise espacial realizada por meio do Google Earth Engine (GEE) permitiu identificar as áreas mais suscetíveis à degradação ambiental e com potencial de infiltração comprometido. Observou-se que a ausência de cobertura vegetal nas áreas com maior propensão à infiltração, aliada à predominância da agricultura extensiva, pode favorecer a contaminação dos aquíferos e comprometer o abastecimento público de água. Esse cenário destaca a necessidade urgente de implementar práticas sustentáveis de manejo, como a recomposição da vegetação nativa e o uso de técnicas de conservação do solo.

Nesse contexto, é essencial fortalecer políticas que incentivem produtores rurais, especialmente os grandes produtores de agricultura extensiva, a aderirem ao Programa Produtor de Água na Bacia do Pipiripau. A participação desses produtores é estratégica, já que as áreas mais sensíveis para recarga dos aquíferos estão justamente em regiões de cultivo intensivo. O programa promove práticas conservacionistas que aumentam a infiltração e garantem a proteção dessas áreas críticas. Além disso, é fundamental ampliar o monitoramento e fiscalização do uso de agroquímicos, garantindo assim a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos essenciais ao abastecimento da região. Recomenda-se, portanto, o uso deste estudo como subsídio técnico para o monitoramento contínuo das ações do Programa Produtor de Água, permitindo avaliar a efetividade das medidas adotadas, orientar novas intervenções e definir áreas prioritárias para conservação e recuperação ambiental.

A proximidade da Bacia do Ribeirão Pipiripau com a Estação Ecológica Águas Emendadas (ESECAE) reforça a importância estratégica dessa área para a conservação da biodiversidade do bioma Cerrado. No entanto, a presença de rodovias e a ocupação desordenada dificultam a formação de corredores ecológicos, essenciais para o deslocamento da fauna silvestre e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Diante disso, torna-se fundamental adotar medidas eficazes de recuperação ambiental e gestão integrada, reconhecendo a relevância dessas áreas para o abastecimento hídrico do Distrito Federal.

As diretrizes e políticas públicas voltadas para a proteção das APMs precisam ser reforçadas, com a criação de instrumentos legais específicos e a efetiva fiscalização do uso e ocupação do solo. A integração entre órgãos públicos, sociedade civil, produtores rurais e o setor privado é imprescindível para garantir a conservação dos recursos hídricos e a segurança hídrica da região.

Por fim, destaca-se que a gestão eficiente da bacia do Ribeirão Pipiripau depende da implementação de práticas sustentáveis, de políticas públicas robustas e da participação ativa de todos os setores da sociedade. Somente com ações coordenadas e efetivas será possível assegurar a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos, promovendo a sustentabilidade ambiental e garantindo o abastecimento de água para as gerações presentes e futuras.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. The Nature Conservancy. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Distrito Federal. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (EMATER). **Programa Produtor de Água: relatório de diagnóstico socioambiental da Bacia do Ribeirão Pípiripau. Brasília: ANA/TNC/Emater-DF/GDF, 2010.**
- AGÊNCIA REGULADORA DE ÁGUAS, ENERGIA E SANEAMENTO BÁSICO DO DISTRITO FEDERAL - ADASA. **Análise de Impacto Regulatório – AIR Projeto Piloto (2019).** Superintendência de Recursos Hídricos – SRH Coordenação de Regulação - CORH.
- AGUIAR, L. S. G.; TARGA, M. S.; BATISTA, G. T. **Escoamento superficial na bacia hidrográfica do Ribeirão Itaim.** Revista Ambi-Água, v. 2, n. 1, p. 44-56, 2007.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. **Köppens's climate classification map for Brazil.** Meteorologische Zeitschrift, v. 22, n.6, p. 711-728, 2013.
- ALVARENGA, C. C.; MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; CURTI, N. **Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQSRA) na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, p. 1608-1619, 2012. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500025>
- ALVIM, A. T. B.; COLLET, B. G.; KATO, R. C. V. **Políticas ambientais e urbanas em áreas de mananciais: interfaces e conflitos.** Cadernos MetrÓpole, n. 19, p. 143-164, 10ª semana, 2012. Disponível em : <https://revistas.pucsp.br/index.php/metropole/article/view/8714>
- AMORIM, R. R. **O Projeto Produtor de Água na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pípiripau sob a ótica da teoria da regulação responsiva.** Journal of Law and Regulation, v. 8, n. 1, p. 21- 40, 2022. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/rdsr/article/view/37966>.
- AQUINO, B. G. **Análise da gestão das águas urbanas de Cuiabá: estudo da dinâmica por sub-bacias e a aplicação de gestão integrada a partir de soluções baseadas na natureza.** *Dissertação (Mestrado em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos)* – Universidade do Estado de Mato Grosso, Cuiabá, 2020.
- ARAÚJO, V. **Desmatamento no DF aumentou 612% em 2023, aponta estudo do MapBiomás.** Brasil de Fato, Brasília, 28 maio 2024.
- BIAS, E. S.; PIVELLO L.; GUEDES, S. C.; ROCHA, K. C. **Análise da eficiência da vegetação no controle do escoamento superficial: uma aplicação na Bacia hidrográfica do Rio Bartolomeu, DF.** Geociências, v. 31, n. 3, p. 411-429, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/7041/5046>.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.** Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm.

BRASÍLIA. Governo do Distrito Federal. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF): Matriz Ecológica**. Brasília: Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA-DF), 2017. Disponível em: <http://www.zee.df.gov.br>.

CHAVES, H. M. L.; PIAU, L. P. **Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 1, p. 333-343, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000100031>.

CHEN, T.; GUESTRIN, C. **XGBoost: A Scalable Tree Boosting System**. In: *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 2016. Disponível : <https://dl.acm.org/doi/10.1145/2939672.2939785>

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO PARANAÍBA - CBH. **Características físicas da bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau**. 2023. Disponível em: <https://cbhparanaiba.org.br/resultado-pesquisa?pesquisa=Pipiripau>.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB. **Plano de proteção ambiental da bacia hidrográfica do Ribeirão Pipiripau**. Brasília: 2001. 20 p.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL - CAESB. **Estações Pluviométricas e Fluviométricas da CAESB**. Dados de 2018. Disponível em: <https://atlas.caesb.df.gov.br/hidrometeorologia/>.

COMPANHIA DE PLANEJAMENTO DO DISTRITO FEDERAL - CODEPLAN-DF. **Atlas do Distrito Federal 2020**. Publicado pela Companhia de Planejamento do Distrito Federal (2020). Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/Atlas-do-Distrito-Federal-2020-Cap%C3%ADtulo-2.pdf>.

COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO DISTRITO FEDERAL – CAESB. **Situação hídrica do Distrito Federal**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://s3.caesb.df.gov.br/www/prod/site1/2024/07/Situacaohidrica.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2025.

Citação no **texto:**
(CAESB, 2018).

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. CRC press, 2019. Disponível em: <https://www.crcpress.com/Assessing-the-Accuracy-of-Remotely-Sensed-Data-Principles-and-Practices/Congalton-Green/p/book/9781138744382>.

DAMAME, D. B.; LONGO, R. M.; DIAS, E. **Impactos ambientais pelo uso e ocupação dos solos em sub bacias hidrográficas de Campinas, São Paulo, Brasil**. Acta Brasiliensis, v. 3, n. 1, p. 1-7, 2019. Disponível em: <http://revistas.ufcg.edu.br/ActaBra>.

DEL REY, G. O.; CUNHA, L. S. **Estimativa de fluxo de base em bacias hidrográficas e sua importância na gestão integrada dos recursos hídricos: estudo de caso da bacia do rio Pipiripau**. Águas Subterrâneas. 2021. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29296>.

DIRZO, R.; YOUNG, H. S.; GALETTI, M.; CEBALLOS, G.; ISAAC, N. J. B.; COLLEN, B. **Defaunation in the Anthropocene**. *Science*, v. 345, n. 6195, p. 401-406, 2014. DOI: [10.1126/science.1251817](https://doi.org/10.1126/science.1251817). Acesso em: 10 mar. 2025

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA- EMBRAPA. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Distrito Federal**. Brasília: EMBRAPA Cerrados, 1978. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/335824>.

FERREIRA, C. P.; CASATTI, L. **Influência da cobertura ripária sobre a ictiofauna de cabeceiras de riachos da bacia do rio Paranapanema, sudeste do Brasil**. *Biota Neotropica*, v. 6, n. 3, p. 1-10, 2006.

FIGUEIREDO, R. O.; GREEN, T. R. **A conservação de bacias e os desafios para a sustentabilidade da agricultura**. Documento n.º. 120. Embrapa Meio Ambiente. 2019. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/202771/1/Conservacao-Desafios-Figueiredo-Doc-120.pdf>.

FIGUEIREDO, G. C; RAMOS, A. E.; LIMA, J. W. Canal Santos Dumont (Capítulo 9). In: LIMA, J. E. F. W.; RAMOS, A. E. (Eds.). **A Experiência do Projeto Produtor de Água na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pibiripau**. Brasília: ADASA, ANA, Emater, WWF Brasil, 2018.

FRIEDMAN, J. H. **Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine**. *The Annals of Statistics*, v. 29, n. 5, p. 1189-1232, 2001. DOI: 10.1214/aos/1013203451

GONÇALVES, M. P. **Análise da distribuição espacial, funcionalidade e atratividade de áreas verdes públicas na cidade de São Carlos, SP**. Dissertação de Mestrado - São Carlos: UFSCar, 19 mar. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/10077>.

GONÇALVES, T. D. **Recursos hídricos no Distrito Federal: modelagem hidrológica para subsidiar a gestão sustentável na bacia do Ribeirão Pibiripau**. 2012. xv, 134 f., il. Tese (Doutorado em Geociências Aplicadas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012. Disponível em: https://repositorio.unb.br/jspui/bitstream/10482/12196/1/2012_TatianaDinizGoncalves.pdf

GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. **Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone**. *Remote sensing of Environment*, v. 202, p. 18-27, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425717302900>.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. *Matriz Ecológica do Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal (ZEE-DF)*. Brasília: GDF, 2018. Disponível em: https://www.zee.df.gov.br/wp-content/uploads/2018/05/ZEEDF_CT01_Matriz-Ecologica.pdf.

GOVERNO DO DISTRITO FEDERAL. **Estudo técnico de projeções climáticas para o Distrito Federal e RIDE-DF**. Brasília: SEMA-DF, 2019. Disponível em: <https://www.sema.df.gov.br/estudos-de-projecoes-de-mudancas-do-clima-para-a-regiao-integrada-de-desenvolvimento-do-distrito-federal-e-entorno-ride/>.

GUEDES, D.M.; MARQUES, D. M.; RODRIGUES, R. L. H; BRAVO, J. M.; FRAGOSO JUNIOR, C. R.; CAVALCANTI, J. R. **Influência da cobertura/do uso do solo sobre a hidrodinâmica do reservatório da Usina Hidrelétrica de Barra Grande, SC.** Revista Engenharia Sanitária Ambiental, v. 28, p.8, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220057>.

HADDAD, N. M.; BRUDVIG, L. A.; CLOBERT, J.; DAVIES, K. F.; GONZALEZ, A.; HOLT, R. D.; LOVEJOY, T. E.; SEXTON, J. O.; AUSTIN, M. P.; COLLINS, C. D.; COOK, W. M.; DAMSCHEN, E. I.; EWERS, R. M.; FOSTER, B. L.; JENKINS, C. N.; KING, A. J.; LAURANCE, W. F.; LEVEY, D. J.; MARGULES, C. R.; MELBOURNE, B. A.; NICHOLLS, A. O.; ORROCK, J. L.; SONG, D.-X.; TOWNSHEND, J. R. **Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems.** Science Advances, v. 1, n. 2, p. e1500052, 2015. DOI: 10.1126/sciadv.1500052.

IBRAM – INSTITUTO BRASÍLIA AMBIENTAL. **Plano de Manejo da Estação Ecológica de Águas Emendadas – Versão Resumida.** Brasília, DF: IBRAM, 2009. Disponível em: https://www.recursoshidricos.df.gov.br/aguas_emendadas/planos/PlanoManejo_VersaoResumida.pdf.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual Técnico de Pedologia.** 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 430 p. (Manuais técnicos em geociências, n. 4). ISBN 978-85-240-4359-8.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico 2022.** Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/>.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTATÍSTICA DO DISTRITO FEDERAL (IPEDF). Nota Técnica N° 05/2023: **Análise da Mudança de Uso e Cobertura da Terra nas Áreas de Proteção de Manancial – APM do Distrito Federal: 1985, 1997, 2009 e 2021.** Brasília, 2023.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Climatologia.** Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>.

JAGDALE, S. D; NIMBALKAR, P. T. **Infiltration studies of different soils under different soil conditions and comparison of infiltration models with field data.** International Journal of Advanced Engineering Technology, v. III, n. II, p. 154-157, April-June 2012. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/337858258>.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. **The measurement of observer agreement for categorical data.** Biometrics, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/843571/>. Acesso em: 3 fev. 2025.

LAURANCE, W. F.; VASCONCELOS, H. L.; LOVEJOY, T. E. **Forest loss and fragmentation in the Amazon: implications for wildlife conservation.** *Oryx*, v. 34, n. 1, p. 39-45, 2000. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/journals/oryx/article/forest-loss-and-fragmentation-in-the-amazon-implications-for-wildlife-conservation/31B51D65FB5EE4C4E65AE73994E72C38>

LIMA, C. A. G.; SILANS, A. P. Variabilidade espacial da infiltração de água no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 34, n. 12, p. 2311-2320, 1999. DOI: 10.1590/S0100-204X1999001200018.

LIMA, J. E. F. W.; FREITAS, G. K.; PINTO, M. A. T.; SALLES, S. B. A. (2018). **Gestão da Crise Hídrica 2016 - 2018: experiência do Distrito Federal**. Disponível em: <http://www.adasa.df.gov.br>.

LIMOEIRO, A. **Delimitação de Áreas Potenciais para Recarga Hídrica Subterrânea: Estudo de Caso nas Sub-Bacias do Rio das Pedras e Rio Paiaíá, Bahia**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/bitstream/ri/33896/1/TFG%20-%20Alessandra%20Limoeiro%20-%20Final.pdf>.

LOPES, T. R.; NASCIMENTO, J. G.; PACHECO, A. B.; DUARTE, S. N.; NEALE, C. M. U.; FOLEGATTI, M. V. **Estimativa de produção de sedimentos e perda de solo em uma bacia de abastecimento de água para a região metropolitana de São Paulo - Brasil**. *Journal of South American Earth Sciences*, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.103929>.

LOUSADA, E. O.; CAMPOS, J. E. G. Estudos isotópicos em águas subterrâneas do Distrito Federal: subsídios ao modelo conceitual de fluxo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 41, n. 2, p. 355–365, 2005.

LOUCKS, D.P.; VAN BEEK, E.; STEDINGER, J.R.; DIJKMAN, J.P.M. **Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications**. UNESCO. 2005. Cham: Springer. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-44234-1>.

MAIDMENT, D. R. **Handbook of hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1993. xx, ca. 1000 p. Disponível em: https://dl.watereng.ir/HANDBOOK_OF_HYDROLOGY.PDF.

MAIA, A. G.; MIYAMOTO, B. C. B.; GARCIA, J. R. **Climate Change and Agriculture: Do Environmental Preservation and Ecosystem Services Matter?** *Ecological Economics*, v. 152, p. 27–39, 2018.

MAPBIOMAS Project, 2023, "**Collection 8 of the Annual Land Cover and Land Use Maps of Brazil (1985-2022)**". Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomass/VJIJCL>. MapBiomass Data, V1.

MARASLIS, G. T. **Influência do uso e ocupação do solo na geração de escoamento superficial de uma pequena bacia costeira utilizando o modelo SWAT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/241056/PGEA0735-D.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>.

MARTINS, G. M. de F.; MARINHO, B. T. S.; NASCIMENTO, E. B. P.; COUTINHO, V. de O.; DIAS, G. de O.; MARTINS, I. G. M.; MAIA, J. L.; VIEIRA, E. M. **Áreas de preservação**

permanente como suporte à gestão dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 8, n. 19, p. 777-792, 2021.

MEERKHAN H.; FREITAS L.; ROCHA F.; PEREIRA A. J. S. C.; CHAMINÉ H. I. **Delineating springs safeguard zones with DISCO-URBAN index: a valuable tool for groundwater vulnerability mapping in localscale urban areas.** *Discov Water* v. 2:2, p. 2022. <https://doi.org/10.1007/s43832-022-00011-z>

MELO, W. L. S.; BATISTA, G. T.; TARGA, M. S.; RODRIGUES, N. A. **Análise comparativa do uso do solo e estimativa do escoamento superficial com base na capacidade de infiltração da bacia hidrográfica do Itaim, Taubaté, SP.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX, 2011, Maceió. Anais [...]. Maceió: ABRH, 2011.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto.** Brasília, 2012. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5550408/mod_resource/content/3/LivroSensoriamentoRemoto.pdf

MIGUEL, P.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; MOURA-BUENO, J. M.; TIECHER, T. **Identificação de fontes de produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica de encosta.** *Ciência Rural*, v. 44, n. 2, p. 286-292, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200023>.

MONTEIRO, J. C.; BACELLAR, L. A. P. **Influência dos fatores geológicos, geomorfológicos e antrópicos da produção de fluxo de base em pequenas bacias hidrográficas na APA Cachoeira das Andorinhas, Ouro Preto (MG).** *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 15, n. 2, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i2.398>.

NASCIMENTO, R. C. **Fluxo de Th e identificação de fontes de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Ipojuca.** 2021. 125 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

NASCIMENTO, P. W. F.; CARVALHO, R. P. B.; COSTA, V. C. **Avaliação do potencial de infiltração relativo das bacias hidrográficas urbanas do Rio Anil e do Rio Grande (município do Rio de Janeiro).** Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. (2017).

NUNES, J. F.; ROIG, H. L. **Análise e Mapeamento do Uso e Ocupação do Solo da Bacia do Alto do Descoberto, DF/GO, por Meio de Classificação Automática Baseada em Regras e Lógica Nebulosa.** *Revista Árvore*, v. 39, n. 1, p. 25-36, 2014.

OKUMURA, A. T. R.; SILVA, A. G.; SILVA, N. R. S.; LOPES, E. R. N., BIFANO, R. B. A.; QUILENATO, R. V. **Determinação da qualidade da água de um rio tropical sob a perspectiva do uso.** *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.13, n. 04, p. 1835-1850, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/243982/36130>.

OLIVEIRA, J. P. D. **Sistemas verdes de drenagem urbana.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Minho, 2020. Disponível em:

<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/69800/1/Disserta%C3%A7%C3%A3o%20Jo%C3%A3o%20Pedro%20Dias%20de%20Oliveira.pdf>.

OLIVEIRA, P. T. S.; WENDLAND, E. C.; NEARING, M. A.; SCOTT, R. L.; ROSOLEM, R.; ROCHA, H. R. **The water balance components of undisturbed tropical woodlands in the Brazilian cerrado**. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, p. 2899–2910, 2016. doi:10.5194/hess-19-2899-2016

OLIVEIRA, F. R.; NEVES, G.; SENA-SOUZA, J. P.; ALVES, R. P.; MARTINS, E. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; NARDOTO, G. B. **Análise da Fragmentação da Paisagem da Bacia Hidrográfica do Alto São Bartolomeu como Subsídio ao Modelo Pressão-Estado-Resposta**. *Espaço & Geografia*, v. 17, n. 1, p. 207-234, 2014. Disponível em: <https://periodicos.unb.br/index.php/espacoegografia/article/view/347>. Acesso em: 10 mar. 2025.

PASSOS, M. C.; RIBEIRO, F. P.; TEIXEIRA, T. M.; VALADÃO, M. B. X. **Water crisis in the Distrito Federal, Brazil: an academic view**. *Research, Society and Development, [S. l.]*, v. 9, n. 11, p. ???, 2020. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/9518>.

PAVIANI, A.; COSTA, A. B. B.; CASTRO, K. B. **Análise do consumo de água tratada no período de racionamento no Distrito Federal. Brasília**. 2018. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. Recuperado de: <http://www.codeplan.df.gov.br>.

PEREIRA FILHO, S. R. **A vulnerabilidade às mudanças climáticas no Distrito Federal**. In: UNB Notícias, 30 mai. 2022. Disponível em: <https://noticias.unb.br/artigos-main/5748-a-vulnerabilidade-as-mudancas-climaticas-no-distrito-federal>.

PRIMAVESI, A. M. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 4. ed. São Paulo: Nobel, 1984. 541 p.

PRINA, B. Z.; TRENTIN, R. **GMC: Geração de Matriz de Confusão a partir de uma classificação digital de imagem do ArcGIS®**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 17, 2015, João Pessoa. Anais [...]. São José dos Campos: INPE, 2015.

RAMBALDI, D. M.; OLIVEIRA, D. A. S. (Org.). **Fragmentação de ecossistemas: causas, efeitos sobre a biodiversidade e recomendações de políticas públicas**. Brasília: MMA/SBF, 2003. Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/179/publicacao/179_publicacao09072009110234.pdf

RAMOS-SCHARRON, C. E.; MACDONALD, L. H. **Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources**, St. John, U.S. Virgin Islands. *Catena*, v. 71, n. 2, p. 250-266, 2007.

RAZZANO, F.; IANDOLO, M. R.; ZARRO, C.; YOGESH, G. S.; ULLO, S. L. **Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for Earth surface classification using Machine Learning algorithms implemented on Google Earth Engine**. *arXiv preprint*, arXiv:2308.11340, 2023. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2308.11340>.

REIS, L. F. R.; BRANDÃO, J. L. B. **Impactos ambientais sobre rios e reservatórios**. Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão. Tradução. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. **Fitofisionomias do bioma Cerrado**. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P. (Ed.). Cerrado: ambiente e flora. Planaltina, DF: Embrapa; CPAC, p. 89-166, 1998. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/554094>.

RODRIGUES, P. J. F. P.; NASCIMENTO, M. T. **Fragmentação florestal: breves considerações teóricas sobre efeitos de borda**. Rodriguésia, v. 57, n. 1, p. 63-74, 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rod/a/d5KVDwFFRvJXC58JsYJBGdr/?lang=pt>.

SANTOS, L. S.; KOIDE, S. **Avaliação da recarga de águas subterrâneas em ambiente de Cerrado com base em modelagem numérica do fluxo em meio poroso saturado**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 21, n. 2, p. 451-465, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v21n2.p451-465>.

SANTOS, L. A. C.; VIEIRA, L. M. F.; MARTINS, P. T. A.; FERREIRA, A. A. **Conflitos de Uso e Cobertura do Solo para o Período de 1985 a 2017 na Bacia Hidrográfica do Rio Caldas-GO**. Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 189-211, 2019. Disponível em: <https://periodicos.unievangelica.edu.br/index.php/fronteiras/article/view/2660>.

SANTOS JUNIOR, E. R.; BONTEMPI, R. M.; FANTIN, M. SANTOS. **Replanejar com a Paisagem: uma abordagem multimétodo sobre a adoção de infraestrutura verde para bacias hidrográficas em urbanização**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 15, n. 03, p. 1478-1494, 2022.

SENA-SOUZA, J. P.; MARTINS, É. de S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; REATTO, A.; VASCONCELOS, V.; GOMES, M. P.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; REIS, A. M. **Mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do Rio São Bartolomeu, escala 1:100.000**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2013. 60 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, ISSN 1676-918X, 314). Disponível em: http://bbeletronica.cpac.embrapa.br/versaomodelo/html/2013/bolpd/bold_314.shtml.

SERAPHIM, A. P. A. C. C.; BEZERRA, M. C. L. **Identificação de áreas de recarga de aquíferos e suas interfaces com áreas propícias à urbanização**. Paranoá, v. 12, n. 23, p. 68-83, 2019. Disponível em : <https://doi.org/10.18830/issn.1679-0944.n23.2019.07>

SRIDEVY, S.; RAJ, M. N.; KUMARESAN, P.; BALAKRISHNAN, N.; TILAK, M.; RAJ, J. AROCKIA S.; RANI, P. **Jona Innisai. Mapping of soil properties using machine learning techniques**. International Journal of Environment and Climate Change, v. 13, n. 8, p. 684-700, 2023.

STRASSBURG, B. B. N.; BROOKS, T.; FELTRAN-BARBIERI, R.; IRIBARREM, A.; CROUZEILLES, R.; LOYOLA, R.; LATAWIEC, A. E.; OLIVEIRA FILHO, F. J. B.; SCARAMUZZA, C. A. M.; SCARANO, F. R.; SOARES-FILHO, B.; BALMFORD, A. **Moment of truth for the Cerrado hotspot**. *Nature Ecology & Evolution*, v. 1, n. 4, p. 0099, 2017. DOI: [10.1038/s41559-017-0099](https://doi.org/10.1038/s41559-017-0099).

TABARELLI, M.; GASCON, C. **Lições da pesquisa sobre fragmentação: aperfeiçoando políticas e diretrizes de manejo para a conservação da biodiversidade**. Megadiversidade, v. 1, n. 1, p. 181-188, 2005.

TENENWURCEL, M. A. **Estimativa da recarga potencial de aquíferos na bacia hidrográfica do Rio Bicudo - MG. 2021**. 98 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Análises de Sistemas Ambientais) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Belo Horizonte, 2021.

THE NATURE CONSERVANCY BRASIL (TNC). **Coalizão pelas Águas (2022)**. Disponível em: <https://www.tnc.org.br/o-que-fazemos/nossas-iniciativas/coalizao-pelas-aguas/?vu=coalizaopelasaguas>.

TIECHER, T.; MINELLA, J. P. G.; MIGUEL, P.; ALVAREZ, J. W. R.; PELLEGRINI, A.; CAPOANE, V.; CIOTTI, L. H.; SCHAEFER, G. L.; SANTOS, D. R. **Contribuição das fontes de sedimentos em uma bacia hidrográfica agrícola sob plantio direto**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 2, p. 639–649, 2014.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**, Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p. 2005.

VASCONCELOS, V. V.; MARTINS JUNIOR, P. P.; HADAD, R. M.; KOONTANAKULVONG, S. **Recarga de aquíferos: epistemologia e interdisciplinaridade**. *Interthesis*, v. 10, n. 2, p. 360–409, 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277712925_Recarga_de_Aquiferos_epistemologia_e_interdisciplinaridade. Acesso em: 15 mar. 2025.

VENTER, Z. S.; SYDENHAM, M. M. A. K. **Continental-scale land cover mapping at 10 m resolution over Europe (ELC10)**. *arXiv preprint*, arXiv:2104.10922, 2021. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2104.10922>.

VIANA, J.L; ZOLIN, C.A; BACCIN, G.N; SANTOS, R. 2016. **Infiltração de água do solo em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo**. Embrapa Jornada Científica: https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1065675/1/2016cpamtzolinifiltracao_sololatossolovermelhoamarelodistropicodiferentesmanejos48.pdf

WORLD BANK (2021). **World Development Indicators 2021**. Banco Mundial. Acesso em 1º de abril de 2023. Disponível em: <https://datatopics.worldbank.org/world-development-indicators/themes/environment.html>].

WEI, Y.; LI, L.; SANG, Y.; WANG, X.; KANG, W.; LI, Z. **Effects of changes in climate and anthropic activities on the ratio of bed load to suspended load in the Yellow River**. Scientific Reports, v. 13, 19299, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-46427-4>

ZWIRTES, A. L.; GEBLER, L.; SILVA, V. R.; RODRIGUES, R. B.; SILVA, L. S.; GEBLER, E. **Caracterização físico-hídrica de solos submetidos a diferentes manejos**. *Applied Research & Agrotechnology*, v. 4, n. 3, p. 51-66, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/260310901_Caracterizacao_fisico-hidrica_de_solos_submetidos_a_diferentes_manejos.

ANEXO

Código Google Earth Engine

```
// 1. Carregar imagens do Sentinel-2
var sentinel2 = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')
  .filterDate('2024-01-01', '2024-05-31') // Filtro por data
  .filterBounds(geometry) // Filtro pela área de interesse
  .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10)); // Filtro por cobertura de nuvens

// 2. Gerar mosaico temporal por mediana espectral
var mosaic = sentinel2.median().clip(geometry);

// 3. Selecionar bandas espectrais e índices
var bands = ['B2', 'B3', 'B4', 'B8']; // Bandas do Sentinel-2
var image = mosaic.select(bands);

// 4. Adicionar NDVI como uma banda adicional
var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).rename('NDVI');
var image = image.addBands(ndvi);

// 5. Carregar amostras de treinamento (exemplo com 7 classes)
var trainingData = ee.FeatureCollection([
  ee.Feature(geometry1, {'class': 0}), // Classe 0: Água
  ee.Feature(geometry2, {'class': 1}), // Classe 1: Vegetação Nativa
  ee.Feature(geometry3, {'class': 2}), // Classe 2: Áreas Agrícolas
  ee.Feature(geometry4, {'class': 3}), // Classe 3: Áreas Urbanas
  ee.Feature(geometry5, {'class': 4}), // Classe 4: Solo Exposto
  ee.Feature(geometry6, {'class': 5}), // Classe 5: Pastagens
  ee.Feature(geometry7, {'class': 6}) // Classe 6: Florestas
]);
```

```
// 6. Treinar o modelo Gradient Boosting
var classifier = ee.Classifier.smileGradientTreeBoost()
  .setOutputMode('CLASSIFICATION')
  .train({
    features: trainingData,
    classProperty: 'class',
    inputProperties: bands.concat(['NDVI'])
  });

// 7. Classificar a imagem
var classified = image.classify(classifier);

// 8. Visualizar os resultados
Map.addLayer(classified, {min: 0, max: 6, palette: ['blue', 'green', 'yellow', 'red', 'brown', 'lightgreen',
'darkgreen']}, 'Classificação');

// 9. Exportar resultados (opcional)
Export.image.toDrive({
  image: classified,
  description: 'Classificacao_Usos_Solo',
  scale: 10,
  region: geometry,
  maxPixels: 1e13
});
```