

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
Instituto de Geociências  
Programa de pós-graduação em Geografia

Victor Cordeiro da Silva

**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CLASSES DE SOLOS BRASILEIROS:**  
**Uma abordagem prática sobre serviços ecossistêmicos**

Belo Horizonte  
2024

Victor Cordeiro da Silva

**CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CLASSES DE SOLOS BRASILEIROS:  
Uma abordagem prática sobre serviços ecossistêmicos**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Geografia.

Área de Concentração: Geografia Física e Análise Ambiental

Orientadora: Prof. Dra. Adriana Monteiro da Costa

Belo Horizonte  
2024

S586c  
2024

Silva, Victor Cordeiro da.

Condutividade hidráulica de classes de solos brasileiros [manuscrito] : uma abordagem prática sobre serviços ecossistêmicos / Victor Cordeiro da Silva. – 2024. 75 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientadora: Adriana Monteiro da Costa.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Área de concentração: Geografia Física e Análise Ambiental.

Inclui bibliografias.

1. Física do solo – Teses. 3. Solos – Classificação – Teses. 4. Solo – Uso – Planejamento – Teses. 5. Bacias hidrográficas – Administração – Teses. 6. Serviços ambientais – Teses. I. Garcia, Ricardo Alexandrino. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:556



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
COLEGIADO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

### FOLHA DE APROVAÇÃO

"CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DE CLASSES DE SOLOS BRASILEIROS: UMA ABORDAGEM PRÁTICA SOBRE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS"

**VICTOR CORDEIRO DA SILVA**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia 30 de agosto de 2024, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, constituída pelos seguintes professores:

**Adriana Monteiro da Costa**

IGC/UFMG

**Cristiane Valéria de Oliveira**

IGC/UFMG

**João Herbert Moreira Viana**

EMBRAPA

**Maíse Soares de Moura**

Pesquisadora

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Monteiro da Costa, Professora do Magistério Superior**, em 03/09/2024, às 18:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Herbert Moreira Viana, Usuário Externo**, em 04/09/2024, às 10:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cristiane Valeria de Oliveira, Professora do Magistério Superior**, em 04/09/2024, às 13:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maíse Soares de Moura, Usuário Externo**, em 10/09/2024, às 19:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3521176** e o código CRC **73AFFE94**.

À minha mãe e ao meu irmão. Dedico a vocês, que, mesmo sem compreenderem ou se interessarem pelas explicações da minha pesquisa, me ofereceram apoio incondicional e proporcionaram muito mais do que o necessário para que eu chegasse até aqui.

## AGRADECIMENTOS

À minha mãe e ao meu irmão, que desde que eu me candidatei a entrar em uma universidade me apoiam e abraçam conjuntamente comigo todos os meus sonhos. Sonhar sozinho é necessário, sonhar acompanhado traz alegria e sentido à vida. Minha vida é mais colorida e tem mais sentido por desde sempre e para sempre vocês estarem nela. Ao meu sobrinho amado, que mesmo sem entender direito a necessidade de eu estar longe, sempre me incentivava “a fazer as tarefas da escola”. Amo incondicionalmente e eternamente vocês.

À minha companheira, que esteve comigo durante toda a minha caminhada acadêmica. Obrigado por ser meu apoio nas horas difíceis, me auxiliando a ter as melhores e mais fartas risadas. Você trouxe a tranquilidade e a paz que faltava. Os dias mais difíceis ficam mais leves com você e os mais alegres ficam mais felizes e especiais. Você sempre será minha parceira de vida, independente das circunstâncias. Esse trabalho também tem seu suor.

À minha orientadora, Adriana Monteiro da Costa, que durante os últimos anos tive o prazer de acompanhar e aprender em diversas situações, acadêmicas ou não. Agradeço todos os puxões de orelha, todo o apoio e incentivo. Dizer que você foi fundamental para o desenvolvimento dessa dissertação não é o suficiente, principalmente para quem esteve presente em tantas reviravoltas da minha vida, acadêmica e profissional. Obrigado pela escuta, obrigado pelo carinho, obrigado pela amizade construída fora do Laboratório e, principalmente, obrigado por ter acreditado em mim durante todos os anos em que trabalhamos juntos.

Aos amigos que o IGC me trouxe, João Marcos, Guilherme, Késia, Mariana, Carol, Luiza, Facury, Brey-Gil, Bárbara, Isadora, Beatriz e tantos outros que dividiram comigo, em algum ou vários momentos, essa longa e instável jornada. Ao Max Paulo, que me ensinou a ser crítico na vida e a reconhecer que a ciência de verdade é muito mais que artigos publicados. À Maíse, que sempre esteve lá para me auxiliar nas escolhas mais difíceis, tanto na vida pessoal quanto na profissional. Os ensinamentos que obtive com vocês não são hierarquizados com títulos.

À família Barbosa, que não carrego o nome em meu registro, mas tenho comigo o que aprendi com vocês: o sangue quente, o coração grande e a determinação de ir atrás do que eu quero.

À todos que, por um descuido, eu não citei, mas que caminharam comigo alguma parte dessa incrível jornada.

Na vida, basta o sol, o solo e, claro, a poesia para que tudo valha a pena  
(Hunter x Hunter, 2011, ep.135, temp. 5).

## Resumo

O solo desempenha um papel crucial na organização do sistema ambiental e na sustentação de diversas atividades humanas, sendo um agente indispensável na prestação de Serviços Ecossistêmicos (SE). Contudo, a definição e delimitação da provisão real desses serviços enfrentam desafios significativos, especialmente em bacias hidrográficas sujeitas à intensa influência antrópica, como aquelas próximas a áreas urbanas. Tais desafios são particularmente evidentes em ambientes variados, como a bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, localizada em Sete Lagoas, Minas Gerais (MG), que apresenta uma ampla variabilidade pedológica já catalogada. Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo principal compreender como se constrói a dinâmica de provisão dos Serviços Ecossistêmicos Hídricos (SEH) ao longo da unidade territorial da bacia. Para isso, a pesquisa aborda os processos relacionados à movimentação hídrica no solo, os impactos das atividades humanas sobre as características físico-hídricas e a relação entre essas dinâmicas e o provisionamento potencial dos SEH. A análise utilizou o Potencial de Uso Conservacionista (PUC) como ferramenta para avaliar os SEH em associação com as dinâmicas de uso e cobertura do solo. A pesquisa destacou as potencialidades da bacia hidrográfica, particularmente no que tange à distribuição de seus aspectos físicos, que vêm sendo submetidos a diversas pressões devido a intervenções antrópicas. Essas alterações podem comprometer a capacidade natural da bacia de organizar e sustentar serviços ecossistêmicos essenciais. A avaliação dos SEH ao longo da unidade territorial foi realizada a partir dos valores de Condutividade Hidráulica Saturada ( $K_{sat}$ ), obtidos por meio de anéis volumétricos. As medições realizadas nos horizontes A e B das diferentes classes de solo evidenciaram uma significativa variabilidade entre esses horizontes, com maiores valores registrados no horizonte A. Os resultados demonstraram uma forte relação com os processos de gênese do solo, especialmente em áreas com elevados teores de carbono orgânico (CO), independentemente dos usos e coberturas do solo predominantes.

Palavras-chaves: água no solo; condutividade hidráulica saturada; classes de solo; gestão territorial; serviços ecossistêmicos.

## **Abstract**

The soil plays a crucial role in the organization of the environmental system and the support of various human activities, serving as an indispensable agent in the provision of Ecosystem Services (ES). However, defining and delimiting the actual provision of these services face significant challenges, especially in watersheds subjected to intense anthropogenic influence, such as those near urban areas. These challenges are particularly evident in diverse environments, such as the Córrego Marinheiro watershed, located in Sete Lagoas, Minas Gerais (MG), which exhibits a broad pedological variability already cataloged. In this context, the main objective of this dissertation is to understand how the dynamics of the provision of Hydrological Ecosystem Services (HES) are constructed throughout the territorial unit of the watershed. To achieve this, the research addresses processes related to water movement in the soil, the impacts of human activities on soil physical-hydraulic characteristics, and the relationship between these dynamics and the potential provision of HES. The analysis employed the Potential for Conservation Use (PCU) as a tool to evaluate HES in association with land use and land cover dynamics. The research highlighted the watershed's potentialities, particularly regarding the distribution of its physical aspects, which have been subjected to various pressures due to anthropogenic interventions. These changes may compromise the watershed's natural capacity to organize and sustain essential ecosystem services. The evaluation of HES throughout the territorial unit was conducted using Saturated Hydraulic Conductivity (Ksat) values obtained through volumetric rings. Measurements taken in the A and B horizons of different soil classes revealed significant variability between these horizons, with higher values observed in the A horizon. The results demonstrated a strong relationship with soil genesis processes, especially in areas with high organic carbon (OC) content, regardless of the predominant land uses and covers.

**Keywords:** water in soil; saturated hydraulic conductivity; soil classes; territorial management; ecosystem services.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Marinheiro-MG.....	18
<b>Figura 2</b> - Variáveis ambientais utilizadas no Método PUC .....	31
<b>Figura 3</b> - Mapa de Uso e Cobertura .....	33
<b>Figura 4</b> - Classe de Pastagem ao longo do baixo curso da bacia com a presença de plantas invasoras .....	34
<b>Figura 5</b> - Pastagem ocupando os fundos de vale e vertentes suaves no terço superior da bacia, havendo a presença de plantas invasoras e uma área de solo exposto ao fundo .....	35
<b>Figura 6</b> - Classes de Silvicultura (a), Pivô Central (b), Cultivo (c) e Corpo Hídrico (d).....	36
<b>Figura 7</b> - Classe de Formação Florestal (a) consolidada no terço inferior da bacia, entre os campos experimentais da EMPRABA; (b) Classe de Formação Florestal observada ao fundo da imagem, situada ao longo de um morro, recobrendo as duas vertentes no interior de uma propriedade provada .....	37
<b>Figura 8</b> - Mapa do Potencial de Uso Conservacionista.....	40
<b>Gráfico 1</b> - Distribuição dos valores médios de Ksat para cada um dos horizontes avaliados .....	64
<b>Tabela 1</b> - Classe de Uso e Cobertura do Solo na bacia do Córrego do Marinheiro - MG .....	32
<b>Tabela 2</b> - Resultado do Potencial de Uso Conservacionista .....	39
<b>Tabela 3</b> - Matriz PUC.....	43
<b>Tabela 4</b> - Descrição dos pontos amostrais para a bacia do córrego do Marinheiro - MG .....	57
<b>Tabela 5</b> – Valores de Ksat por horizonte pedológico.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	-	Agência Nacional de Águas
ASF	-	Alos Palsar
APA	-	Área de Preservação Ambiental
BT	-	B textural
CO	-	carbono orgânico
CNPMS	-	Centro Nacional de Pesquisas de Milho e Sorgo
CWA	-	Clima subtropical úmido
CONABIO	-	Comissão Nacional da Biodiversidade
K	-	Condutividade Hidráulica
KSAT	-	Condutividade Hidráulica Saturada
EMBRAPA	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ILPF	-	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
MEA	-	Millennium Ecosystem Assessment
MG	-	Minas Gerais
MMA	-	Ministério do Meio Ambiente
P1	-	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico nitossólico
P2	-	Luvissolo Háptico Pálico típico
P3	-	Latosolo Vermelho Eutrófico típico
P4	-	Nitossolo Háptico Eutrófico típico
P5	-	Latosolo Vermelho-Amarelo Distrófico úmbrico
P6	-	Cambissolo Húmico Eutrófico
P7	-	Cambissolo Flúvico Tb Eutrófico típico
P8	-	Cambissolo Háptico Tb Distrófico típico
P9	-	Argissolo Vermelho Eutrófico chernossólico
P10	-	Latosolo Vermelho Distrófico húmico
P11	-	Latosolo Vermelho-Amarelo Distrófico húmico
PUC	-	Potencial de Uso Conservacionista
USGS	-	Serviço Geológico dos Estados Unidos da América
SE	-	Serviços Ecossistêmicos
SEH	-	Serviços Ecossistêmicos Hídricos
SIBCS	-	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIG	-	Sistema de Informações Geográficas
IUCN	-	União Internacional para a Conservação da Natureza
ZEE	-	Zoneamento Ecológico-Econômico

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO GERAL.....	10
1.1	Objetivos .....	12
1.2	Fundamentação Teórica .....	12
1.3	Área de estudo .....	17
	Referências.....	20
2.	USO E COBERTURA DO SOLO E O POTENCIAL NATURAL DO AMBIENTE: INTERFACE ENTRE OS ELEMENTOS DA PAISAGEM NA PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSSISTEMICOS HÍDRICOS.....	26
2.1	Introdução .....	28
2.2	Metodologia .....	29
2.3	Resultados e Discussão .....	32
2.3.1	Uso e Cobertura do Solo .....	32
2.3.2	Potencial de Uso Conservacionista (PUC) e Matriz PUC.....	39
2.4	Considerações finais .....	45
2.5	Conclusões .....	46
	Referências.....	47
3.	CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA: INTERPRETAÇÕES CONFORME OS HORIZONTES DO SOLO .....	53
3.1	Introdução .....	55
3.2	Materiais e Métodos.....	56
3.3	Resultados e Discussão.....	60
3.4	Considerações finais .....	70
3.5	Conclusão.....	71
	Referências.....	72

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O solo é um sistema complexo, com uma gama variada de atributos físicos, químicos e biológicos, além de se consolidar como elemento essencial das atividades humanas, tanto para ações econômicas quanto para ambientais, tornando-se um componente central na regulação de ecossistemas (Saco *et al.*, 2021). Ao longo do tempo, acompanhando os processos de industrialização, urbanização e modernização da agricultura, o uso dos solos no Brasil se intensificou progressivamente desde meados do séc. XX. De modo concomitante, a preocupação com a conservação e com o uso sustentável dos recursos naturais, que estão diretamente associados a ele, tais como a biodiversidade da flora e da fauna e a qualidade e disponibilidade de água, tem crescido mundialmente nos últimos anos (FAO *et al.*, 2015).

As alterações de uso da terra apresentam grande influência na aceleração dos impactos socioambientais, tanto para a qualidade física do solo como também da água (Santana, 2023). Dessa maneira, faz-se cada vez mais necessária a ampliação de estudos que sejam capazes de integrar diferentes elementos da paisagem e considerar suas inter-relações na organização do ambiente, demonstrando o comportamento de equilíbrio de todo o sistema ambiental, principalmente no âmbito da gestão territorial (Costa *et al.*, 2023; Moura *et al.*, 2024a; Moura *et al.*, 2024b). Nesse caminho, algumas legislações<sup>1</sup> se encontram implementadas para garantir uma visão integrada dos territórios, utilizando a bacia hidrográfica como unidade territorial no processo de gestão dos recursos hídricos (Brasil, 1997).

No que diz respeito aos mecanismos de captação e drenagem das águas pluviais, a bacia hidrográfica se configura como unidade espacial comum, além dos elementos fisiográficos e morfológicos atrelados ao relevo, à cobertura vegetal e às classes de solo presentes nesses ambientes (Mello; Silva, 2013). Ademais, por ser limite natural, sua área pode ultrapassar as delimitações administrativas de diversos municípios, sendo assim o ambiente ideal para a construção de um planejamento integrado, levando em conta os atributos do meio físico, biótico e socioeconômico (Yassuda, 1993).

No entanto, a integração efetiva das partes constituintes acaba se mostrando pouco ativa em referência à conservação ambiental, principalmente nos assuntos que envolvem mecanismos de integração entre água e solo frente às dinâmicas presentes nas bacias hidrográficas. Grande parte das pesquisas que envolve a relação solo-água-plantas tem como principal recorte de análise pequenas unidades pedológicas, não havendo uma interpretação especializada no

---

<sup>1</sup> Lei n.º 209.433 de 1997, conhecida como Lei das Águas.

âmbito de bacias hidrográficas, sendo mais recorrentes na área de física do solo com foco na nutrição de plantas e projetos de drenagem e irrigação (Amaral, 2018).

Ao longo de um ambiente amplo e diverso fisicamente, é de se esperar uma variabilidade de classes pedológicas, principalmente pela forma do relevo e organização das redes de drenagem. Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SiBCS (Santos *et al.*, 2018), as distinções das classes de solos ocorrem por conta de propriedades químicas e físicas no processo de formação dos solos. Essas diferenças, com as interpretações adequadas, podem demonstrar potencialidades e limitações de cada classe de solo frente a determinadas atividades (Costa *et al.*, 2016). Intervenções antrópicas inadequadas sobre o uso e cobertura das terras proporcionam a degradação das funções ambientais exercidas pelo meio, comprometendo o equilíbrio ambiental (MEA, 2005), principalmente quando não há uma gestão adequada do território, levando à insustentabilidade (Moura *et al.*, 2024b).

A sustentabilidade do ambiente pode ser aferida pela prestação de Serviços Ecossistêmicos (SE), que são definidos como os benefícios resultantes das dinâmicas naturais dos ecossistemas, beneficiando os seres humanos em alguma medida (Costanza *et al.*, 2014; Costanza *et al.*, 2016; Haines-Young; Potschin, 2018). Contudo, é fundamental o emprego de estudos integrados para a compreensão do comportamento do ambiente frente às ações antrópicas, mas ainda há escassez de estudos que integrem discussões a respeito do solo e os SE fornecidos por ele, inclusive os hídricos (Costanza *et al.*, 2016; Moura *et al.*, 2024a).

Em um aspecto global, estima-se que 1/3 dos países terão perdas em suas cadeias produtivas pela falta d'água e cerca de 3 milhões de pessoas irão sofrer com secas crônicas ou períodos de estresse hídrico nos próximos anos (Hanjra *et al.*, 2010; Calicioglu *et al.*, 2019). Com a degradação dos recursos hídricos superficiais, a procura por águas subterrâneas tem ganhado cada vez mais relevância (Scanlon *et al.*, 2006), estabelecendo uma maior necessidade de conhecimento dos SE hídricos prestados pelo solo, justamente por ele ser o elo de comunicação entre o ambiente superficial e subterrâneo.

Sendo assim, a partir da compreensão do sistema ambiental das bacias hidrográficas, torna-se possível aferir e inferir os volumes hídricos que se encontram armazenados ao longo das distintas classes de solo, principalmente por esta acumulação estar associada aos inúmeros fatores físicos do meio pedológico, que facilitam a infiltração e o armazenamento de água (Libardi; Gonçalves, 2013), contribuindo significativamente para a prestação de serviços ecossistêmicos hídricos, tanto em qualidade quanto em quantidade (Tenenwurcel *et al.*, 2020; Moura *et al.*, 2024b). A literatura apresenta uma vasta bibliografia sobre a interação entre água

e solo (Fiorin, 2008; Prando, 2010; Panachuki, 2011; Gonçalves, 2012; Klein, 2014), porém, com foco predominante nas dinâmicas produtivas, que se concentram em pequenas faixas de movimentação e armazenagem que possam beneficiar as culturas, fato que limita a compreensão das dinâmicas ambientais, tanto em aspectos qualitativos quanto quantitativos pela ausência de informações para as classes conforme seus atributos classificatórios.

Dessa forma, para uma avaliação integrada dos processos influentes nas dinâmicas hídricas das bacias hidrográficas, avaliar a movimentação hídrica ao longo das classes de solo, buscando os horizontes pedológicos como unidade de análise, torna-se necessário para entender todo esse processo. Sendo assim, a bacia do Córrego Marinheiro, localizada na área periurbana do município de Sete Lagoas, em Minas Gerais, é uma área modelo para esta avaliação, principalmente pela sua variabilidade pedológica, havendo sete classes distintas em primeiro nível categórico (Oliveira, 2016), e os demais atributos ambientais avaliados em outros trabalhos, assemelhando-se a um laboratório vivo (Costa *et al.*, 2016; Oliveira, 2016; Monteiro, 2016; Salis, 2017; Amaral, 2018; Santos, 2018a; Pereira, 2018; Salis, 2020; Pereira, 2023).

### **1.1 Objetivos**

O objetivo geral do trabalho é realizar a aferição da Ksat para as diferentes classes de solo, concentrando as análises nos horizontes diagnósticos das classes de solos.

Como objetivos específicos, buscou-se:

- (a) Identificar a condutividade hidráulica saturada por horizontes pedogenéticos do solo.
- (b) Analisar as relações entre a gestão territorial da bacia hidrográfica e os potenciais serviços ecossistêmicos hídricos prestados.

### **1.2 Fundamentação Teórica**

A definição com maior aceitabilidade sobre o solo foi desenvolvida a partir das ideias de Vasilii Vasilevich Dokuchaev (1846-1903), que caracterizou o solo como um corpo natural organizado naturalmente ao longo do tempo geológico, sendo uma conceituação que serviu de base para inúmeros estudos posteriores (Kämpf; Curi, 2012). A organização desse sistema ocorre com atuação diferencial de diversos fatores de formação – relevo, clima, material de origem, organismos e tempo. Diante dessa variabilidade, esses fatores contribuem para uma organização heterogênea dos solos, apresentando variações frente a aspectos morfológicos, biológicos, físicos, químicos e mineralógicos (Kämpf; Curi, 2012).

Essa diversidade decorre da interação de elementos sólidos, líquidos e gasosos presentes no sistema solo, caracterizando-o como um sistema trifásico (Kiehl, 1979; Lepsch, 2011), onde

a fase sólida corresponde às partículas orgânicas e inorgânicas, enquanto as fases líquida e gasosa, respectivamente, são o volume de solução e de ar presentes no solo.

A parcela sólida do solo é composta tanto por matéria orgânica, resultante da decomposição realizada por microorganismos, quanto por partículas inorgânicas herdadas do material de origem e fruto dos processos de neogênese (Kiehl, 1979; Reichardt; Timm, 2004). Por meio dessa matriz sólida, há a formação do sistema poroso do solo, que é caracterizado pelos espaços vazios entre as frações granulométricas e estruturais (Castro; Cooper, 2019). Estes espaços vagos são ocupados pelas outras duas fases do solo: a líquida e a gasosa. A fase líquida, chamada de solução do solo, é formada por água, sais dissolvidos e compostos coloidais em suspensão (Perez *et al.*, 2022), enquanto a fase gasosa resulta dos processos metabólicos dos organismos presentes, que liberam gases em seu processo metabólico (Filho *et al.*, 2008). Dessa forma, as três fases do solo – sólido, líquido e gasoso – estão sempre presentes, mas com distribuição irregular ao longo do solo, sendo possível identificar variabilidades das fases fluidas, tanto por aspectos naturais quanto por ações humanas (Kiehl, 1979; Filho *et al.*, 2008).

A granulometria da matriz do solo é de grande importância na construção do sistema poroso, pois a variabilidade no tamanho variado das partículas influencia na distribuição, quantidade, tamanho e efetividade dos poros do solo conforme suas funções ambientais, como o armazenamento e fornecimento de água, o fornecimento de nutrientes e o desenvolvimento das raízes da vegetação (Castro; Cooper, 2019). Embora não exista uma classificação exata frente ao tamanho dos poros do solo entre os estudiosos da área, há um consenso sobre as funções que cada tipo de poro exerce no comportamento hídrico do solo, distinguindo-os em dois grandes grupos: não capilares (macroporos) e os capilares capilares (microporos), sendo que na primeira categorização o fluxo hídrico é mais significativo enquanto que na segunda os processos de retenção hídrica são predominantes (Castle; Kredzorn, 1973; Kiehl, 1979; Chen; Wagenet, 1992; Claessen, 1997; Libardi, 2000; Libardi *et al.*, 2013).

Neste sentido, é observável a influência de atributos intrínsecos do meio que exercem influência direta nas dinâmicas naturais dos ecossistemas, que podem vir a beneficiar os seres humanos, conforme a capacidade de armazenamento e condução hídrica dos solos. Brauman *et al.* (2007) definiram que os benefícios gerados para a sociedade provenientes da água doce, em função da dinâmica dos ecossistemas terrestres, são categorizados como Serviços Ecosistêmicos Hídricos, que incluem o fornecimento de água doce, a qualidade da água, a mitigação de inundações e os serviços culturais relacionados à água. Esses serviços são afetados por interações complexas e se relacionam com muitos componentes ambientais, de forma que

as alterações antrópicas nos ecossistemas melhoram ou degradam o fornecimento desses serviços à medida que a água se movimenta pela paisagem (Brauman *et al.*, 2007).

A movimentação hídrica, em subsuperfície, ocorre justamente por meio do sistema poroso do solo, que envolve diversos agentes na construção de poros interconectados que proporcionam maior efetividade ao movimento hídrico no interior do solo. Contudo, a associação sucessiva das partículas unitárias do solo resulta na formação da estrutura/agregados do solo, que contribuem significativamente para a sua estabilidade física (Santos, 2005; Castro; Cooper, 2019). A partir do tamanho e da estabilidade dos agregados formados, origina-se a organização do sistema poroso que é fundamental para o armazenamento e movimentação da água no solo (Kiehl, 1979; Hillel, 1980; Brady, 2013).

A coesão do solo é essencial na dinâmica hídrica interna do ambiente pedológico, pois com a maior estabilidade dos agregados há o aumento da quantidade de macroporos e a redução da resistência de movimentação da solução do solo (Chen; Wagenet, 1992). Distintos fatores contribuem para a maior coesão do solo, contudo há o destaque para a atuação da matéria orgânica que, por suas propriedades físico-químicas, otimiza os processos de agregação e estabilização dos agregados do solo (Kiehl, 1979; Beare *et al.*, 1994; Brady, 2013), fato que contribui diretamente para a maior presença de macroporos ao longo do corpo pedológico, contribuindo para uma melhora dos aspectos físico-hídricos do solo (Centurion; Andrioli, 2000; Brandão *et al.*, 2006; Castro; Cooper, 2019). Além dos aspectos orgânicos, o comportamento dos argilominerais, como óxidos e hidróxidos, mostra-se significativo tanto na agregação quanto na manutenção e conservação da estrutura dos solos tropicais, otimizando aspectos físico-hídricos do solo (Resende *et al.*, 1999).

O caminho da água dentro do perfil do solo é coordenado pelo meio poroso, sendo essencial a compreensão de seu arranjo para caracterizar e quantificar as propriedades físico-hídricas dos solos (Guerif, 1987; Jarvis *et al.*, 1991; Lin *et al.*, 1997). Contudo, o movimento da água no solo é determinado por potenciais energéticos distintos, oriundos de forças diversas - matriciais, gravitacionais, hidráulicas, osmóticas, térmicas e de pressão - havendo um fluxo dos ambientes de maior energia para os menos energéticos (Lisboa, 2006).

Dessa forma, a movimentação no interior do perfil pode ocorrer em diferentes direções e velocidades, variando conforme aspectos internos de cada classe pedológica e até mesmo por condições externas, como os tipos de cobertura vegetal, a topografia e as práticas de uso e manejo do solo (Resende *et al.*, 1999). Com isso, a destruição da organização estrutural do solo

proporciona a redução dos espaços disponíveis para a movimentação hídrica e gasosa, devido ao aumento da densidade do meio (Filho *et al.*, 2008).

Além disso, a dinâmica ao longo do sistema poroso é variável conforme o nível de saturação do ambiente, sendo o ambiente microporoso responsável por maior retenção com a redução dos teores de umidade do solo e, em contrapartida, com o aumento da saturação, o regime de condução torna-se mais significativo através do sistema macroporoso (Libardi, 2000; Libardi, 2010). Ademais, a organização do sistema poroso também influencia a infiltração, sendo ela mais eficiente em solos com maior macroporosidade, por estes atributos permitirem que um maior volume de água atravesse uma camada de solo em um tempo determinado (Rawls *et al.*, 1996). Contudo, solos argilosos bem estruturados também podem apresentar valores elevados de infiltração devido à sua boa estruturação (Ferreira, 1988; Shainberg; Levy, 1995).

Levando em consideração as forças energéticas e as dinâmicas do espaço poroso, em teoria, ao longo de um evento chuvoso, o aumento da umidade no solo deveria se estender ao longo do perfil, começando pelas camadas superficiais e avançando em direção às mais profundas. Entretanto, forma-se uma faixa estreita próximo à superfície do solo onde todos os poros são preenchidos por água, seguida por uma zona de transição entre o ambiente saturado e não saturado, demonstrando uma redução progressiva da umidade conforme o aumento da profundidade (Silveira *et al.*, 2000).

Ao longo da zona não saturada se encontram os maiores valores de transmissão hídrica, associados às menores perdas por evaporação e ao fornecimento hídrico reduzido às plantas, mas essa zona é amplamente variável por depender da quantidade de água que infiltra no solo e se estende, em profundidade, de maneira diversa até em ambientes onde a umidade começa a aumentar (Silveira *et al.*, 2000; Brandão *et al.*, 2006). Nessa sessão do solo, a transmissão da água está intimamente ligada aos teores de umidade do solo e aspectos morfológicos dos poros, sendo observável que onde há o predomínio do ambiente macroporoso e maiores teores de umidade, próximo do nível de saturação, o movimento da água é mais expedito (Silveira *et al.*, 2000).

A relação entre a umidade do solo e a transmissão da água aponta a importância dos macroporos na movimentação da água em ambientes saturados, influenciando diretamente a eficiência do solo em armazenar e transmitir água. A transmissão do solo em ambiente de saturação é denominada como condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ), e seus valores estão diretamente relacionados a diversos parâmetros físico-hídricos do solo, principalmente à organização do sistema poroso (Libardi, 1999).

Para determinar os valores de  $K_{sat}$ , é essencial compreender a geometria, conectividade e continuidade dos poros preenchidos com água, mas em regiões tropicais, onde a organização do espaço poroso é heterogênea, é típico que as classes de solo apresentem comportamentos distintos em relação à condutividade hidráulica, influenciados pela variabilidade estrutural, profundidade, sequência de horizontes e estágio pedogenético (Mesquita; Moraes, 2004; Santos *et al.*, 2018). Este parâmetro varia significativamente devido às diferenças estruturais observáveis interclasse e até mesmo intraclasse, haja vista que a dinâmica de estruturação proporciona arranjos porosos distintos em termos de forma, continuidade e tamanho dos poros (Mesquita; Moraes, 2004).

Para identificar essa variável, diversos métodos, ferramentas e equações foram desenvolvidos ao longo do tempo para inferir os valores de  $K_{sat}$  e da condutividade hidráulica insaturada ( $K$ ). Entre eles, destacam-se os modelos de Reynolds e Elrick (1985), Rossi e Nimmo (1994) e Zhang *et al.* (1998) para  $K_{sat}$ , e os modelos de Van Genuchten (1980), Mualem (1976) e Dourado Neto *et al.* (2011). Entretanto, é importante notar que não existe um método padrão universal para medir  $K_{sat}$  (Dirksen, 1999; McKenzie; Cresswell, 2008), sendo, portanto, usualmente realizadas ponderações e comparações entre diferentes métodos, para a seleção do método mais adequado às circunstâncias específicas do ambiente. Jacka *et al.* (2014) confirmaram essa situação ao revisar comparações publicadas, destacando que a seleção de um método apropriado depende das propriedades do solo, do objetivo da pesquisa, dos recursos disponíveis, do tempo e da precisão desejada.

Essas observações corroboram com a visão de alguns autores sobre o provisionamento de serviços ecossistêmicos hídricos, onde é observável que a composição e configuração da paisagem afetaram a oferta dos serviços hidrológicos, mas a composição era consistentemente mais importante que a configuração para os serviços avaliados (Gordon *et al.*, 2020; Bian *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2019; Chiang *et al.*, 2019; Kusmer *et al.*, 2019). Nessa lógica, os potenciais serviços hídricos são afetados por interações complexas que se relacionam com muitos componentes ambientais, de forma que as alterações, antrópicas ou não, nos ecossistemas modificam a maneira como a água se movimenta pela paisagem (Brauman *et al.*, 2007).

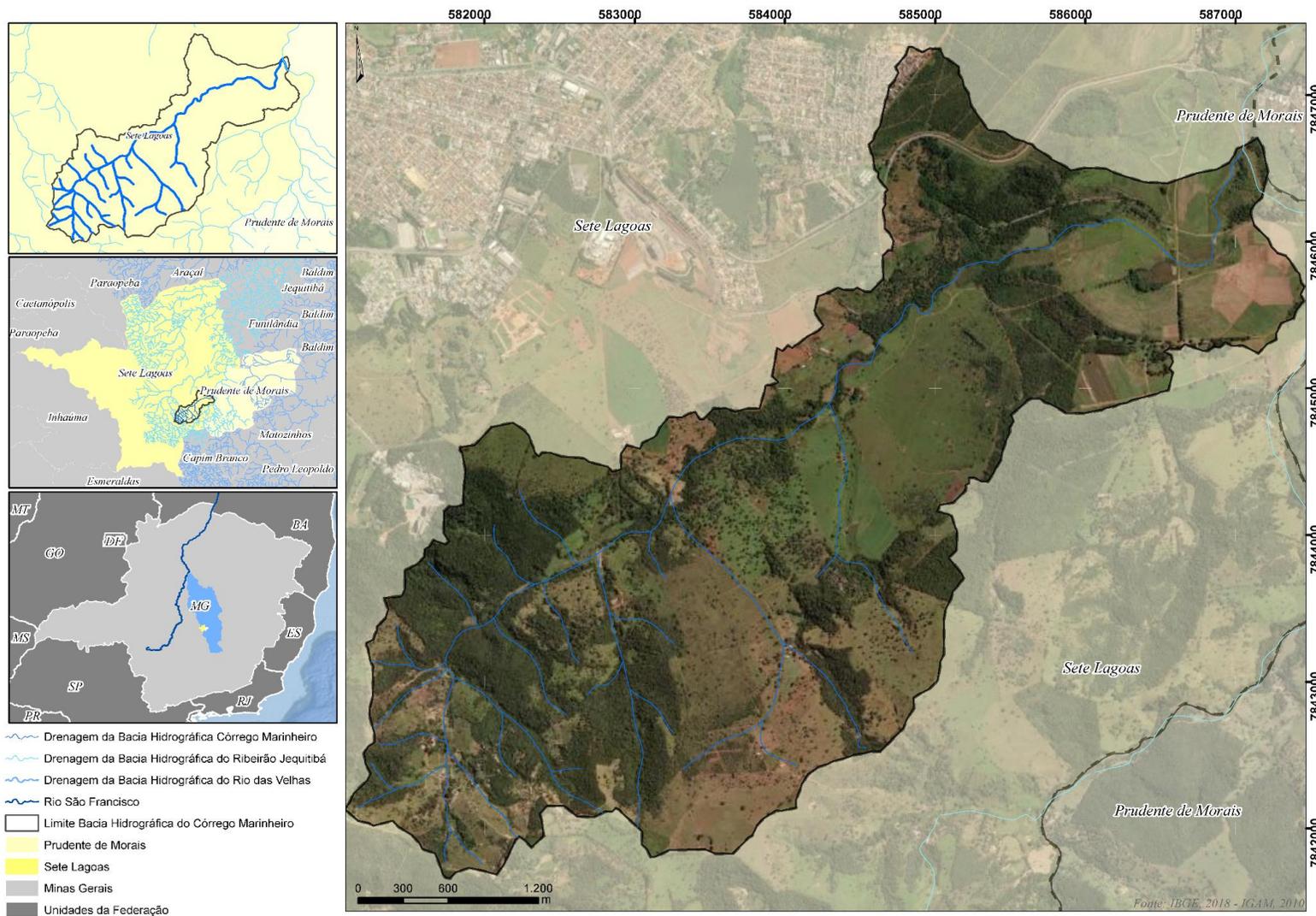
Para quantificar e qualificar tais serviços, é fundamental que ocorra o emprego de abordagens integradas para a compreensão do comportamento do ambiente frente às distintas modificações, inclusive as ações antrópicas (Moura *et al.*, 2024a). Avaliar as dinâmicas de modificação no ambiente e os impactos que irão surgir destas ações é essencial, pois diversos

serviços ecossistêmicos hídricos são insubstituíveis e/ou limitados conforme a capacidade de provisionamento por parte dos ecossistemas (Peng *et al.*, 2019).

Nesse contexto, a avaliação do sistema ambiental traz a possibilidade de aferição dos volumes hídricos que infiltram e circulam no ambiente subsuperficial, ou seja, ao longo das classes de solo sem alcançar o ambiente de saturação subterrâneo, principalmente por todos os atributos pedológicos envolvidos nessa dinâmica. Inúmeros estudos retratados na literatura trazem consigo uma vasta bibliografia sobre a interação entre água e solo (Fiorin, 2008; Gonçalves, 2012; Klein, 2014), porém, com foco predominante nas dinâmicas produtivas, que se concentram em pequenas faixas, com até quarenta centímetros de profundidade, situação que torna inviável para compreender de fato as dinâmicas ambientais e quantificar os SEH prestados.

### **1.3 Área de estudo**

**Figura 1 - Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Córrego Marinheiro-MG**



Fonte: Autor, 2024.

A área de estudo encontra-se no interior do Cráton do São Francisco, apresentando um relevo com presença de colinas suaves côncavo-convexas, com variação altimétrica na faixa de 700m a 800m (Álvares, 2008), com diversos litotipos do grupo Bambuí, oriundos de um processo de sedimentação marinha da Formação Sete Lagoas e pela Formação Serra de Santa Helena, sobrepostas ao embasamento gnáissico-migmatítico (Ribeiro, 2003).

Conforme Pessoa (1996), os litotipos do membro Pedro Leopoldo, incluso na Formação Sete Lagoas, são formados por calcários de cor acinzentada com intercalações escuras de metapelitos e calcários mais escuros. Além disso, Ribeiro (2003) afirma que o membro Lagoa Santa sobrepõe o membro Pedro Leopoldo através de falhamentos, onde geralmente se observam veios de calcita/quartzo. As informações pedológicas mais recentes da bacia são oriundas do mapeamento de Oliveira (2016), em nível de semi-detalle (1:25.000), apresentando sete classes de solos em primeiro nível categórico, conforme Santos *et al.* (2018b), sendo estas: *argissolos, cambissolos, chernossolos, latossolos, luvisolos, neossolos e nitossolos*.

O clima da região é o subtropical úmido (Cwa), apresentando invernos secos e verões quentes e úmidos. No entanto, na bacia do Córrego Marinheiro, Monteiro (2016) identificou quatro unidades climáticas diferentes que são influenciadas pela cobertura do solo, o tipo de vegetação, forma do relevo, além de uma influência da expansão urbana no microclima da bacia. Originalmente, a cobertura vegetal da área tinha o Cerrado como predominante, especialmente os subtipos campos e cerrado típico. Outras fitofisionomias que podem ser encontradas na área são as matas ciliares e de galeria, que apresentam características de Floresta Estacional Semidecidual e Mata Seca (Floresta Decídua) sobre afloramento de calcário. No entanto, o cenário histórico de ocupação da região está associado a atividades agropecuárias e a exploração da madeira nas áreas de Cerrado (Chaves, 2005), situação que se faz dominante no ambiente da bacia pela ampla área ocupada por práticas agropastoris, com a presença de médias propriedades rurais, o Centro Nacional de Pesquisas de Milho e Sorgo – CNPMS (Embrapa Milho e Sorgo) e o *campus* Sete Lagoas da Universidade Federal de São João Del Rey além de uma porção urbanizada oriunda da expansão urbana do município de Sete Lagoas.

## Referências

- ÁLVARES, K. V. **Rede de avaliação e capacitação para a implementação dos planos diretores participativos**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2008.
- AMARAL, J. R. **Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de pós-graduação em Geografia. IGC-UFMG. 2018, 153p.
- BEARE, M. H.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, vol. 58, p. 777-786, 1994.
- BIAN, Z.; LIU, L.; DING, S. Correlation between spatial-Temporal Variation in landscape patterns and surface water quality: A case study in the Yi River watershed, China. **Applied Sciences** (Switzerland), v. 9, n. 6, 2019.
- BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3a ed. Porto Alegre: Bookman. 2013.
- BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da Água no Solo**. 3ª ed. Viçosa, 2006.
- 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, Brasília, DF. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/19433.htm)>. Acesso em 10 de mai. 2023.
- BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K. E. O.; MOONEY, H. A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 32, p. 67–98, 2007.
- CALICIOGLU, O.; FLAMMINI, A.; BRACCO, S.; BELLÙ, L.; SIMS, R. The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. **Sustainability**, v. 11, 2019.
- CASTLE, W. S.; KREZDORN, A. H. Rootstock effects on root distribution and leaf mineral content of 'Orlando' tangelo trees. **Proceedings of Florida State Horticultural Society**, v. 86, p. 80-84, 1973.
- CASTRO, S. S.; COOPER, M. **Fundamentos de micromorfologia de solos**. SBCS, 2019.
- CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Regime hídrico de alguns solos de Jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 701-709, 2000.
- CHAVES, R. M. **Mapeamento da vegetação e uso do solo da bacia hidrográfica do Ribeirão Jequitibá**. Monografia (Especialista em Geoprocessamento) - Curso de especialização em geoprocessamento. Departamento de Cartografia. IGC/UFMG. Belo Horizonte. 2005, 38f.

- CHEN, C.; WAGENET, R. J. Simulation of water and chemicals in macropore soils. **Journal of Hydrology**, v.130, 105-126, 1992.
- CHEN, D.; ZHANG, Y.; SHEN, H.; YAO, M.; HU, M.; DAHLGREN, R. A. Decreased buffering capacity and increased recovery time for legacy phosphorus in a typical watershed in eastern China between 1960 and 2010. **Biogeochemistry**, v. 144, n. 3, p. 273–290, 2019.
- CHIANG, L. C.; CHUANG, Y. T.; HAN, C. C. Integrating landscape metrics and hydrologic modeling to assess the impact of natural disturbances on ecohydrological processes in the chenyulan watershed, Taiwan. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 2, 2019.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. E atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 212 p. 1997.
- COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R.; VIANA, J. H. M. V. Manejo do solo. **Revista Manuelzão**, Belo Horizonte, n. 75, 2016.
- COSTA, A. M.; SILVA, V. C.; ARAÚJO, B. J. R. S.; MOURA, M. S. Reflexões a partir da Aplicação de Modelo para Análise Quantitativa dos Recursos Hídricos Superficiais na Região Metropolitana de Belo Horizonte (Alto e Médio-Alto Velhas) MG. **Revista Geociências - UNG-Ser.** v21, p. 36-49. 2023.
- COSTANZA, R.; DALY, L.; FIORAMONTI, L.; GIOVANNINI, E.; KUBISZEWSKI, I.; MORTENSEN, L.F.; PICKETT, K.E.; RAGNARSDOTTIR, K.V.; DE VOGLI, R.; WIKINSON, R. Modelling and measuring sustainable wellbeing in connection with the UN sustainable development goals. **Ecological Economics**, v.130, p. 350–355. 2014.
- COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; VAN DER PLOEG, S.; ANDERSON, S.J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, p. 152–158. 2016.
- DIRKSEN, C. **Soil Physics Measurements**. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 1999.
- DOURADO NETO, D.; van LIER, Q. J.; van GENUCHTEN, M. T.; REICHARDT, K.; METSELAAR, K.; NIELSEN, D. R. Alternative Analytical Expressions for the General van Genuchten - Mualem and van Genuchten - Burdine Hydraulic Conductivity Models. **Vadose Zone Journal**, Madison, WI, vol. 10, n. 2, p. 618-623. 2011.
- FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. And intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS). **Status of de World's Soil Resources**. Rome, Italy. 2015.
- FERREIRA, M. M. **Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos brasileiros**. Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas. Universidade Federal de Viçosa, 1988.
- FILHO, J. A.; JÚNIOR, R. N. A.; MOTA, J. C. A. **Física do Solo: conceitos e aplicações**. Imprensa Universitária, Fortaleza, 2008.

- FIORIN, T. T. **Estimativa da infiltração de água no solo a partir de pedofunções**. Tese de Doutorado em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- GONÇALVES F. C.; MORAES, M. H. Porosidade e infiltração de água no solo sob diferentes sistemas de manejo. **Irriga**. Botucatu, v. 17, n. 3, p. 337-345, 2012.
- GORDON, B. L.; PAIGE, G. B.; MILLER, S. N.; CLAES, N.; PARSEKIAN, A. D. Field scale quantification indicates potential for variability in return flows from flood irrigation in the high-altitude western US. **Agricultural Water Management**, v. 232, n. February, p. 106062, 2020.
- GUERIF, J. L'analyse de la porosité: Application à étude du compactage des sols. In: MONIER, G.; GROSS, M. J. (Eds.). **Soil Compaction and Regeneration**. Rotterdam: AAB, p. 122-131, 1987.
- HAINES-YOUNG, R., POTSCHIN, M. CICES V5. 1. **Guidance on the Application of the Revised Structure**. Fabis Consulting. 53 2018.
- HANJRA, M.A.; QURESHI, M.E. Global water crisis and future food security in an era of climate change. **Food Policy**, 2010, 35, 365–377.
- HILLEL, D. **Fundamentals of Soil Physics**. San Diego: Academic Press, 413 p. 1980.
- JACKA, L.; PAVLÁSEK, J.; KURÁZ, V.; PECH, P. A comparison of three measuring methods for estimating the saturated hydraulic conductivity in the shallow subsurface layer of mountain podzols. **Geoderma**, v. 219-220, 2014.
- JARVIS, N. J. **MACRO - A Model of Water Movement and Solute Transport in Macroporous Soils**, Monograph - Department of Soil Sciences, Reports and Dissertations 9, University of Agricultural Sciences, 1991. 58 p
- KÄMPF, N.; CURI, N. Formação e evolução do solo (pedogênese). In: KER, J. C.; CURI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. (eds.). **Pedologia: fundamentos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 207-302. 2012.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: Ceres, 262p. 1979.
- KUSMER, A. S.; GOYETTE, J. O.; MACDONALD, G. K.; BENNETT, E.M.; MARANGER, R.; WITHERS, P. J. A. Watershed Buffering of Legacy Phosphorus Pressure at a Regional Scale: A Comparison Across Space and Time. **Ecosystems**, v. 22, n. 1, p. 91–109, 2019.
- LEPSH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. Oficina de Textos, São Paulo, 2011.
- LIBARDI, P. L. Água no solo. In: VAN LIER, Q. J. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 103-152. 2010.
- LIBARDI, P. L. **Determinação da condutância hidráulica e da pressão de borbulhamento de cápsulas porosas para tensiômetros**. Nota de aula. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 1999.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 509p.

LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. D. M. A. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, vol. 37, n. 5, p. 1174-1184. 2013.

LIN, H. S.; MCINNES, K. J.; WILDING, L. P.; HALLMARK, C. T. Low tension water flow in structured soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 77, p. 649-654, 1997.

LISBOA, R. L. **Determinação da condutividade hidráulica não saturada de solos residuais com o permeâmetro de Guelph e ensaio de laboratório**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal de Viçosa, 2006.

MCKENZIE, N.; CRESSWELL, H. Selecting a method for hydraulic conductivity. In: MCKENZIE, N.; COUGHLAN, K.; CRESSWELL, H. (Eds.). **Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation**. SBS Publishers & Distributors PVT. Ltd., New Delhi, Índia, pp. 90–100, 2008

MEA - MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. **Ecosystems and human well-being: synthesis**. Island Press, Washington, DC, ISBN 1-59726-040-1, p. 155. 2005.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. Lavras.ed. UFLA, 2013.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n.3, p. 963-969, 2004.

MONTEIRO, H. C. **Uso da terra e variações de temperatura e umidade relativa do ar na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016, 138 f.

MOURA, M. S.; SILVA, V. C.; FERREIRA, A. M.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T.; COSTA, A. M. Integrating policy, data and technology in pursuing effective management of ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v. 368, p. 122157, 2024a.

MOURA, M. S.; SILVA, V. C.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T.; COSTA, A. M. Beyond land use planning and ecosystem services assessment with the conservation use potential framework: A study in the Upper Rio das Velhas basin, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 923, p. 171437. 2024b.

MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Research**, Washington, DC, vol. 12, n. 3, p. 513-522. 1976.

OLIVEIRA, A. R. de. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de pós-graduação em Geografia. IGC-UFMG. 2016, 74 f.

PANACHUKI, E.; BERTOL, I.; ALVES, T.; OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B. Perdas de solo e de água e infiltração de água em Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, n. 35, p. 1777-1785, 2011.

PENG, L. C.; LIN, Y.P; CHEN, G.W.; LIEN, W.Y. Climate change impact on spatiotemporal hotspots of hydrologic ecosystem services: A case study of Chinan catchment, Taiwan. **Water (Switzerland)**, v. 11, n. 4, 2019.

PEREIRA, M. P. R. **Análise do ambiente e modelagem da favorabilidade de ocorrência do Faveiro-De-Wilson (*Dimorphandra wilsonii rizzini*) Hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG.** Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. IGC-UFMG. 2018, 54p.

PEREIRA, M. R. P. **Geotecnologias e análise urbana:** possibilidades e limitações analíticas a partir do desenvolvimento urbano ambiental do município de Sete Lagoas. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023a.

PEREZ, D. V.; RIGO, M. M.; MARQUES, M. da C. **Fase líquida:** a solução do solo. EMBRAPA Solos, 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1139617/fase-liquida-a-solucao-do-solo>. Acesso em: 15 de mai. de 2023

PESSOA, P. F. P. **Caracterização Hidrogeológica da região cárstica de Sete Lagoas – MG:** potencialidades e risco. 1996. 101 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996.

RAWLS, W. L.; DAVID, G.; van MULLEN, J. A.; WARD, T. J. Infiltration In: ASCE. **Hidrology handbook.** 2 ed. New York, 1996

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera:** conceitos, processos e aplicações. Editora Manole, São Paulo, 2004

RESENDE, M.; CURI, N.; LANI, J. L. **Tropical soils:** implications on sustainable development. In: SCIENCE for Sustainable Development in Latin America and the Caribbean. Rio de Janeiro, Academia Brasileira de Ciências, não paginado, 1999.

REYNOLDS, W. D; ELRICK, D. E. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the  $\alpha$ -parameter using Guelph permeameter. **Soil Science**, vol.140. 1985. University of Guelph, Guelph, Ontario. 1986.

RIBEIRO, J. H.; TULLER, M. P.; FILHO A. D.; PADILHA, A. V.; CORDÓBA C. V. Projeto VIDA: Mapeamento geológico, região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais – **Relatório final**, escala final 1:50 000.2 Ed., Belo Horizonte: CPRM, 54p. 2003.

ROSSI, C.; NIMMO, J. R. Modeling of soil water retention from saturation to oven dryness. **Water Resources Research**, Washington, DC, vol. 30, n. 3, p. 701 – 708. 1994.

SACO, P.M.; MCDONOUGH, K.R.; RODRIGUEZ, J.F.; RIVERA-ZAYAS, J.; SANDI, S.G. **The role of soils in the regulation of hazards and extreme events.** Philos. The Royal Society, 2021.

- SALIS, H. H. C. **Modelagem Hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG**. Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. IGC-UFMG. 2017, 52p.
- SALIS, H. H. C.; COSTA, A. M.; VIANNA, J. H. M.; SCHULER, A. E. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do córrego do marinheiro, Sete Lagoas-MG. **Boletim de Geografia**, v. 37, n.2, p. 189-201. 2020.
- SANTANA, M. L. T. **Soil health and ecosystem services related to water recharge in the cantareira system**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2023.
- SANTOS, D. DE F. M. DOS; COSTA, D. M. DA; OLIVEIRA, F. S; VIANA, J. H. M. Monitoramento do uso e cobertura do solo em Sete Lagoas E Prudente De Moraes - MG Entre 1990-2015. **RA' E GA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 39, p. 57-74, 2018a.
- SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; dos ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIRDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa. 5ª ed. 2018b.
- SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Predição e mapeamento de capacidade de retenção de água do solo usando funções de pedotransferência e modelagem quantitativa. **Congresso Brasileiro De Ciência Do Solo**, 30., Recife, PE. Anais Recife: SBCS. 2005.
- SCANLON, B.R.; KEESE, K.E.; FLINT, A.L.; FLINT, L.E.; GAYE, C.B.; EDMUNDS, W.M.; SIMMERS, I. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. **Hydrology Processes**, v20, p. 3335-3370. 2006.
- SHAINBERG, I.; LEVY, G. J. Infiltration and seal formation processes. In: **Soil erosion, conservation, and rehabilitation**. New York, 1995.
- SILVEIRA, A. L.; LOUZADA, J.A; BELTRAME, L.F. Infiltração e armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. Ed. Porto Alegre. 2000.
- TENENWURCEL, M. A.; MOURA, M. S.; COSTA, A. M.; MOTA, P. K.; VIANA, J. H. M.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. An improved model for the evaluation of groundwater recharge based on the concept of conservative use potential: a study in the River Pandeiros watershed, Minas Gerais, Brazil. **Water**, v. 12, n. 4, 2020.
- VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, WI, vol. 44, p. 892-898. 1980.
- YASSUDA, E. R. Gestão de recursos hídricos: fundamentos e aspectos institucionais. **Revista da Administração Pública**, vol. 27, n. 2, p. 5 - 18. 1993.
- ZHANG, Z. F.; GROENEVELT, P. H.; PARKIN, G. W. The well - shape factor for the measurement of soil hydraulic properties using the Guelph Permeameter..Department of Land Resource Science, University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada. **Soil & Tillage Research**, vol. 49, p. 219 - 221. 1998.

## **2. USO E COBERTURA DO SOLO E O POTENCIAL NATURAL DO AMBIENTE: INTERFACE ENTRE OS ELEMENTOS DA PAISAGEM NA PRESTAÇÃO DE SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS HÍDRICOS**

### **RESUMO**

As alterações no uso e cobertura da terra influenciam diretamente a qualidade do solo e da água, sendo fatores críticos de degradação ambiental. Na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, em Sete Lagoas-MG, a aplicação do modelo de Potencial de Uso Conservacionista (PUC) identificou cinco categorias de potencial ambiental: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. As classes “alto” e “muito alto” PUC abrangem 67,75% da área total, indicando predominância de ambientes favoráveis à infiltração hídrica e à conservação ambiental, enquanto as classes “baixo” e “muito baixo” representam menos de 2%, com maior suscetibilidade à erosão. A interseção do PUC com as classes de uso do solo destacou que 41% das formações florestais estão em áreas de Alto PUC, promovendo a recarga hídrica e a provisão de serviços ecossistêmicos. Já 44% situam-se em “médio” PUC, evidenciando o papel mitigador da cobertura florestal. As pastagens, predominantes na bacia, concentram-se nas áreas de “médio” a “muito alto” PUC, demandando manejo sustentável para evitar degradação. Os resultados enfatizam a necessidade de estratégias integradas para gestão territorial, equilibrando conservação e uso agropecuário. Políticas públicas devem priorizar práticas sustentáveis, recuperação de áreas degradadas e preservação da biodiversidade, incluindo espécies ameaçadas como o Faveiro-de-Wilson (*Dimorphandra wilsonii* Rizzini). A gestão eficiente da bacia requer articulação entre potencial ambiental e uso atual do solo, garantindo a sustentabilidade dos serviços ecossistêmicos e dos recursos naturais.

Palavras-chave: uso e cobertura do solo, potencial de uso conservacionista, gestão territorial

## ABSTRACT

Changes in land use and cover directly influence soil and water quality, acting as critical factors of environmental degradation. In the Córrego Marinho watershed, located in Sete Lagoas-MG, the application of the Conservational Use Potential (PUC) model identified five categories of environmental potential: very low, low, medium, high, and very high. The “high” and “very high” PUC classes cover 67.75% of the total area, indicating a predominance of environments favorable for water infiltration and environmental conservation, while the “low” and “very low” classes represent less than 2%, showing greater susceptibility to erosion. The intersection of the PUC with land use classes revealed that 41% of forest formations are in areas of “high” PUC, promoting water recharge and the provision of ecosystem services. Meanwhile, 44% are located in “medium” PUC areas, highlighting the mitigating role of forest cover. Pastures, predominant in the basin, are concentrated in “medium” to “very high” PUC areas, requiring sustainable management to prevent degradation. The results emphasize the need for integrated strategies for territorial management, balancing conservation and agricultural use. Public policies should prioritize sustainable practices, the recovery of degraded areas, and the preservation of biodiversity, including threatened species such as the Faveiro-de-Wilson (*Dimorphandra wilsonii* Rizzini). Efficient management of the basin requires the articulation of environmental potential and current land use, ensuring the sustainability of ecosystem services and natural resources.

Keywords: land use and land cover, potential for conservation use, territorial management

## 2.1 Introdução

As mudanças de uso e cobertura da terra são consideradas as principais causas de alterações na superfície terrestre e são reconhecidas como principal fator de degradação da qualidade do solo e água, principalmente pelas ações antrópicas (Coelho, 2007). Todavia, a atenção para processos de conservação da biodiversidade está se tornando cada vez mais presente no cotidiano, levando em consideração as diferentes formas de intervenções antrópicas na superfície (Barbosa *et al.*, 2016; Mello *et al.*, 2020).

Práticas inadequadas de modificação da superfície terrestre têm intensificado a erosão dos solos, o assoreamento dos corpos hídricos, mudanças no microclima e a redução da biodiversidade ao longo de unidades territoriais distintas (Piroli; Levyman, 2020; Andrade, 2020). Diversas são as práticas responsáveis pela modificação do arranjo ambiental, havendo destaque para a produção agropecuária, expansão urbana e atividades industriais que indicam crescimento ao longo de ambientes distintos, sendo necessárias atenções especiais na organização do território (Mendes, 2022).

Com intuito de auxiliar no controle territorial, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei n.º 9.433/97) define a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão (Brasil, 1997). Neste cenário, distintas ferramentas são empregadas para uma otimização da gestão territorial, havendo maior utilização de geotecnologias e análise espacial (Fitz, 2008). As geotecnologias são caracterizadas por equipamentos e métodos de processamento matemático e computacional que oferecem alternativas para compreensão da ocupação e utilização do ambiente no tempo e no espaço (Piroli, 2010; Mendes, 2019; Piroli; Levyman, 2020), sendo ferramentas importantes para fornecer e sintetizar informações em qualquer estudo ambiental (Sobral *et al.*, 2017).

Na consolidação da paisagem, mesmo ela sendo formada pela interação de fatores naturais, culturais e históricos, o solo é um elemento fundamental. O uso deste elemento é regulado por um conjunto de regras e códigos que buscam de alguma forma gerenciar o território (Pereira, 2023a), mas para uma organização efetiva é necessário que ocorra o conhecimento deste recurso e dos demais atrelados a ele; principalmente tratando-se da relação solo e água, na qual há narrativas em variáveis escalas para a provisão/gerenciamento destes recursos (Alsdorf *et al.*, 2007; Agência Nacional de Águas - ANA, 2019).

Essas ações de controle devem levar em conta atributos intrínsecos do meio que influenciam diretamente as dinâmicas dos ecossistemas, que podem beneficiar os seres humanos, inclusive com o aumento da capacidade de armazenamento e condução hídrica dos

solos. Brauman *et al.* (2007) definiram que os benefícios gerados a partir da água doce, em função da dinâmica dos ecossistemas terrestres, são categorizados como Serviços Ecossistêmicos Hídricos. Esses serviços são afetados por interações complexas e se relacionam com muitos componentes ambientais, de forma que as alterações antrópicas nos ecossistemas melhoram ou degradam o fornecimento desses serviços à medida que a água se movimenta pela paisagem (Brauman *et al.*, 2007).

Todavia, já há indicativos de que as práticas de manejo influenciam diretamente na efetividade dos serviços prestados pelo solo (Pereira *et al.*, 2018; O'Riordan *et al.*, 2021). Neste cenário, as modificações no uso e cobertura do solo afetam os recursos, especialmente no que diz respeito à disponibilidade de água (MacDonald *et al.*, 2000; Kosmas *et al.*, 2000; Hamza *et al.*, 2005).

Nesse contexto, o Potencial de Uso Conservacionista (PUC) surge como uma ferramenta versátil em que é possível identificar as potencialidades e limitações do meio físico, especialmente em relação às dinâmicas hídricas no solo, usos agrícolas e resistência aos processos erosivos (Costa *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2019b; Freitas *et al.*, 2022; Mucida *et al.*, 2023). Com isso, torna-se possível identificar/categorizar ao longo de um determinado ambiente as vantagens obtidas pela capacidade natural do meio, que, atrelada ao mapeamento de uso e cobertura do solo, torna-se possível avaliar se as modificações antrópicas são condizentes com o potencial ambiental natural observado.

Tendo em vista essas circunstâncias, este trabalho foi construído com o intuito de avaliar as dinâmicas ambientais ao longo da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, localizada no município de Sete Lagoas-MG, objetivando identificar ambientes com maiores potenciais para a prestação de Serviços Ecossistêmicos Hídricos e, se estes se encontram ameaçados por consequência do uso e cobertura do solo atuais.

## **2.2 Metodologia**

Para o mapeamento de uso e cobertura do solo, utilizaram-se imagens do satélite Sentinel-2 (ESA, 2015) com resolução espacial de 10 metros, obtidas junto do Serviço Geológico dos Estados Unidos da América (USGS, 2017). O processamento do conjunto de dados foi executado em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), por meio do *software* ArcGis 10.8 (ESRI, 2020). As etapas executadas para a obtenção do produto foram concentradas em seis etapas, sendo: i) pré-processamento; ii) coleta de amostras; iii)

classificação; v) validação de campo; vi) correções manuais. Cada etapa exigiu um conjunto de procedimentos específicos que são descritos a seguir.

No pré-processamento, foi realizado o recorte das imagens para a área de interesse, bem como a composição das bandas obtidas pelo satélite. A coleta de amostras foi efetuada para definir valores/características de cada uma das classes observáveis, seguida da posterior espacialização dos valores para outras áreas conforme sua assinatura espectral em comparação com as amostras obtidas (Cruz; Ribeiro, 2008). A verificação de campo foi efetuada, com foco em ambientes que provocavam confusão visual, sendo, portanto, correções manuais após a validação para a consolidação do mapeamento de uso e cobertura. A edição pontual das classes foi realizada ao longo do mapeamento de uso e cobertura.

Na consolidação do Potencial de Uso Conservacionista (PUC), utilizou-se a metodologia proposta por Costa *et al.* (2018; 2019b), contando com a padronização do sistema de coordenadas e recorte das variáveis declividade, solo e litologia utilizados no processo. A declividade foi extraída do *Alos Palsar* (ASF, 2015), os dados pedológicos extraídos do mapeamento de Oliveira (2016) e os dados litológicos obtidos por Sampaio *et al.* (2016)<sup>2</sup>. Cada uma das variáveis foi reclassificada com pontuações específicas conforme seus atributos, de acordo com os critérios propostos por Costa *et al.* (2018), em que os autores executaram uma extensa revisão bibliográfica acerca de cada uma das classes de declividade, solo e litologia frente ao potencial de recarga hídrica, à resistência à erosão e ao potencial de uso agropecuário.

Em seguida, utilizando-se álgebra de mapas, a equação PUC descrita por Costa *et al.* (2019b, 2018) foi aplicada:

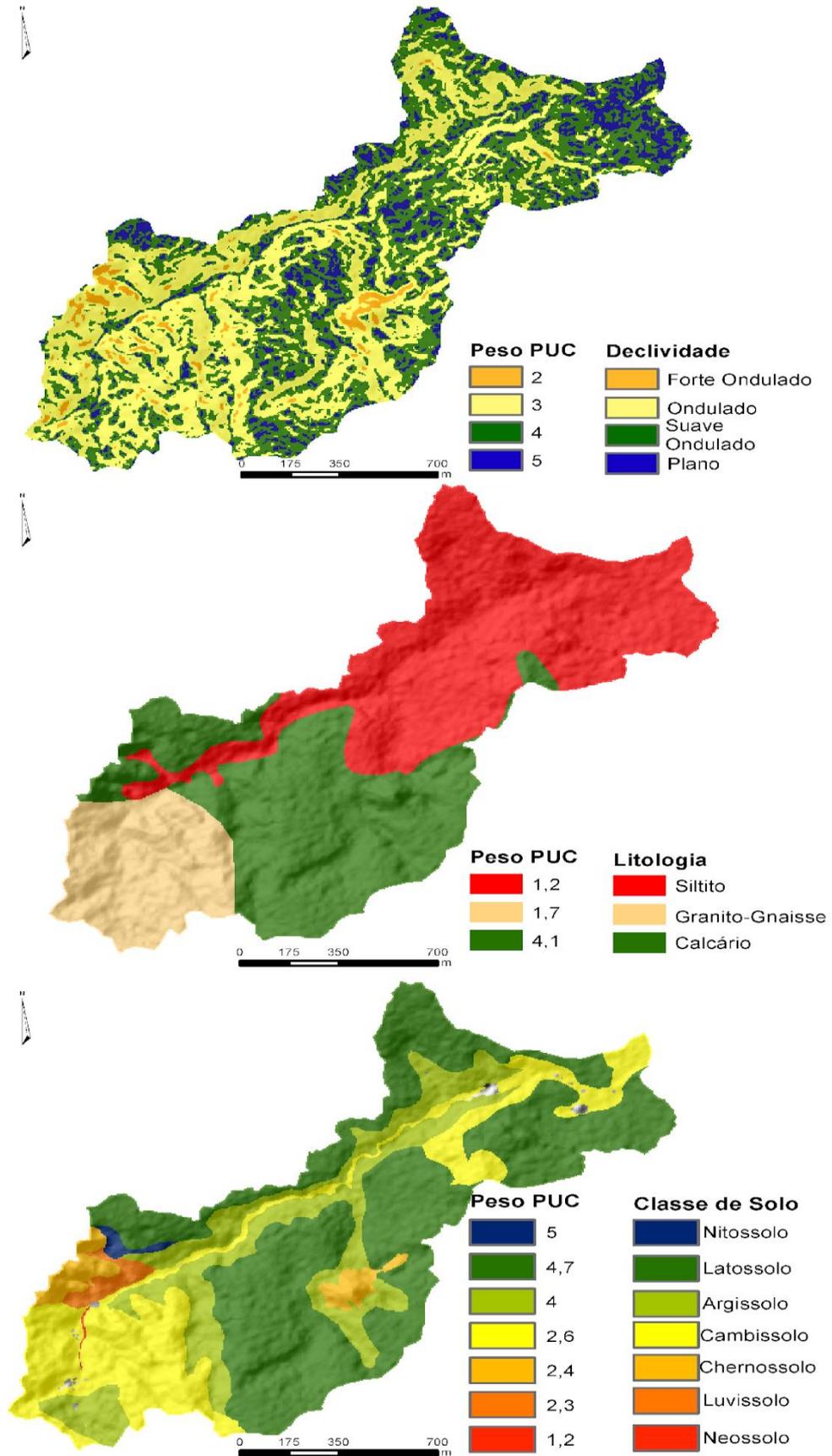
$$\text{PUC} = [(\text{Declividade} \times 0,5) + (\text{Solo} \times 0,39) + (\text{Litologia} \times 0,11)]$$

Cada uma das variáveis utilizadas apresenta sua distribuição na figura 2.

---

<sup>2</sup> SAMPAIO, J. D.; SILVA, S. A. M.; VIANA, J. H. M. V.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R. **Mapa litológico preliminar da bacia do córrego Marinheiro**. Belo Horizonte: [s.d.], 2016. Mapa litológico. Arquivos vetoriais armazenados em memória flash portátil. Não publicado.

**Figura 2 - Variáveis ambientais utilizadas no Método PUC**



Fonte: Autor, 2024.

O resultado raster da álgebra cartográfica foi reclassificado em categorias correspondentes às classes da PUC: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto, respeitando os intervalos estabelecidos por Costa *et al.* (2019b). Para avaliação das compatibilidades de uso, estabeleceu-se a consolidação de uma matriz numérica entre os resultados do PUC e os dados de uso e cobertura do solo, cujo produto é denominado Matriz PUC (Costa *et al.*, 2019c). A matriz PUC permite inferências sobre a adequação do uso e ocupação do solo e dos aspectos físicos do meio, fornecendo bases para subsidiar políticas públicas com elaboração de plano e projetos de adequação ambiental das bacias hidrográficas.

## 2.3 Resultados e Discussão

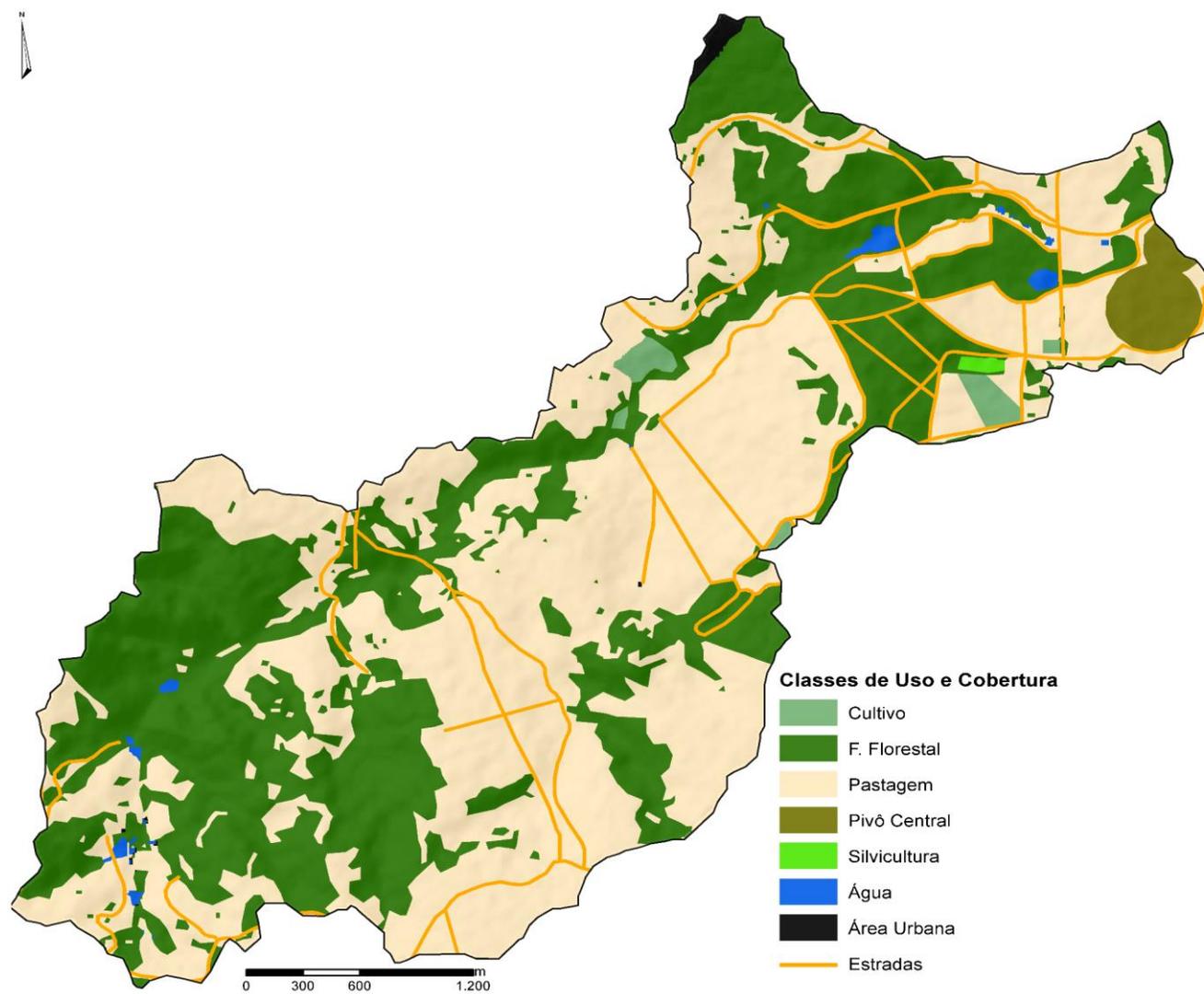
### 2.3.1 Uso e Cobertura do Solo

Foram identificadas 7 (sete) classes de uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro (Tabela 1 e Figura 3). As classes incluem água, área urbana, cultivo, formação florestal, pastagem, área irrigada e silvicultura, distribuídas de forma heterogênea ao longo dos diferentes ambientes da bacia.

**Tabela 1** - Classe de Uso e Cobertura do Solo na bacia do Córrego do Marinheiro - MG

Classe	Área (ha)	%
Água	7,52	0,51
Área Urbana	9,84	0,66
Área Irrigada	24,43	1,65
Cultivo	4,37	0,29
Formação Florestal	619,81	41,82
Pastagem	814,19	54,94
Silvicultura	1,91	0,13

Fonte: Autor, 2024

**Figura 3 - Mapa de Uso e Cobertura**

Fonte: Autor, 2024.

Na unidade territorial da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, a classe de pastagem ocupa 54,94% da área total, com maior concentração no terço médio da bacia, onde ocorre a associação com formas mais estáveis de relevo. A organização física da área caracteriza-se por um relevo suave ondulado, que forma uma longa vertente com variações leves de declividade, assentada predominantemente sobre Latossolos Vermelhos e Vermelhos-Amarelos (Oliveira, 2016). Esses solos se destacam por seu maior grau de evolução pedogenética (Santos *et al.*, 2018).

Com um elevado desenvolvimento pedológico, o ambiente apresenta condições favoráveis para suportar o processo de pastejo do gado, devido à sua melhor organização estrutural em comparação às demais classes de solo. Os Latossolos exibem alta porosidade e permeabilidade, tornando-os mais adequados para usos agropecuários (Costa *et al.*, 2018). Essa condição é evidenciada ao longo das áreas cobertas por pastagens, onde não são observados sinais severos de degradação do solo, como ravinas, sulcos ou voçorocas (Figura 4).

**Figura 4** - Classe de Pastagem ao longo do baixo curso da bacia com a presença de plantas invasoras



**Fonte:** Autor, 2023.

No entanto, em algumas áreas, é possível observar solo exposto, o que indica o início de um processo de degradação, tanto do ambiente de pastejo quanto do solo (Dias-Filho, 2017). Além disso, há a presença de plantas invasoras ao longo das áreas de pastagem, o que gera uma disputa pelo solo, especialmente no que diz respeito à disponibilidade de água e minerais. Esse fator também sugere um nível de degradação das pastagens (Macedo, 2013; Dias-Filho, 2017).

No terço superior da bacia, as áreas de pastagem predominam nos fundos de vale menos escavados, com vertentes longas e de declividade suave (Figura 5). Essas áreas apresentam características semelhantes às demais da bacia, como a presença de plantas invasoras e solo exposto em alguns pontos.

**Figura 5** - Pastagem ocupando os fundos de vale e vertentes suaves no terço superior da bacia, havendo a presença de plantas invasoras e uma área de solo exposto ao fundo



**Fonte:** Autor, 2023.

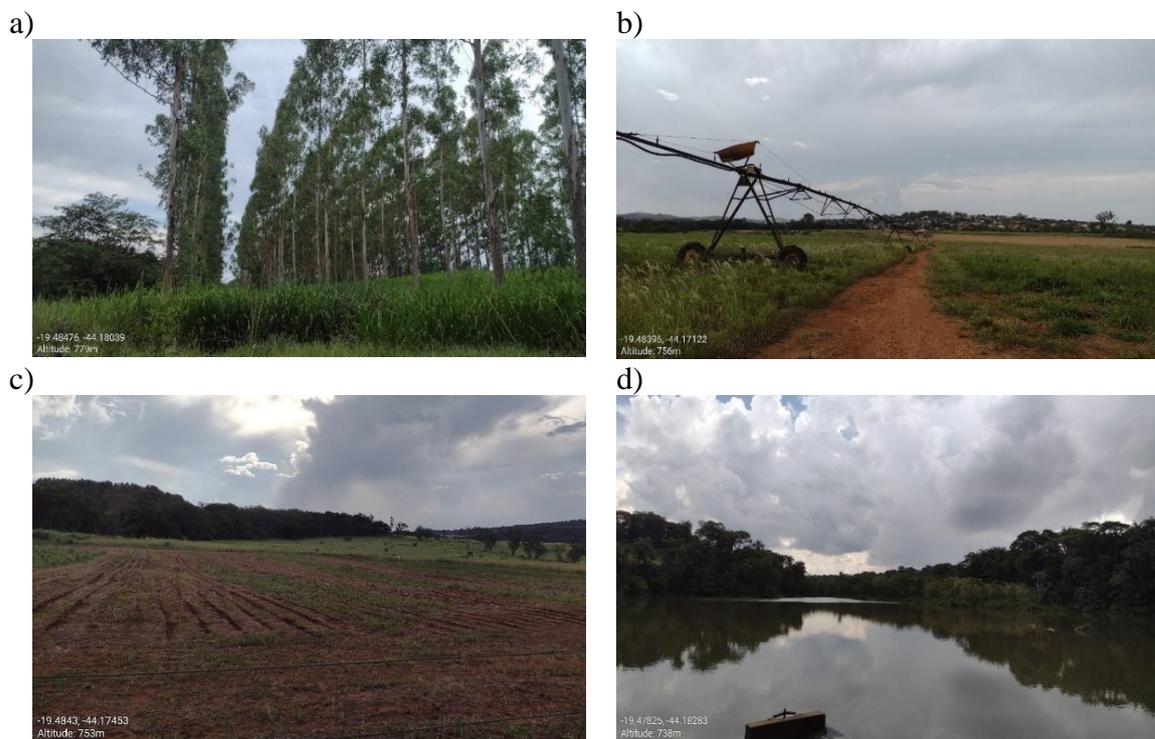
De maneira semelhante, no terço inferior da bacia, as áreas de pastagem ocupam uma parcela significativa do território, estendendo-se sobre regiões de relevo suavemente ondulado. Contudo, a região próxima ao exutório da bacia apresenta uma maior diversidade de usos, devido à presença de áreas de pesquisa experimental da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Nessa área, destacam-se dois usos específicos, presentes apenas nesse ambiente: as áreas de Silvicultura e a Área Irrigada, que ocupam cerca de 0,13% e 1,65% do território da bacia, respectivamente.

É importante salientar que a presença dessas classes de uso no baixo curso da bacia parece estar voltada para fins de pesquisa institucional. No caso da silvicultura, isso é evidenciado pela implementação de um sistema ILPF (Integração Lavoura-Pecuária-Floresta) (Figura 6a). Além dessas duas classes de uso, ainda no baixo curso da bacia, observam-se cultivos agrícolas em ambientes específicos e bem delimitados, associados a dois cenários

distintos: o cultivo realizado por pequenos produtores e os processos de pesquisa e desenvolvimento da EMBRAPA.

Em conjunto, há amplos corpos hídricos artificiais, formados por barramentos, que são utilizados no processo de irrigação dos campos experimentais por meio de um extenso sistema de bombeamento de água (Figura 6), conforme os dados de demanda hídrica da bacia (Costa *et al.*, 2022). No terço superior da bacia, também são observados corpos hídricos associados a infraestruturas urbanas de pequenos sítios e chácaras, que são utilizados para pesca recreativa.

**Figura 6** - Classes de Silvicultura (a), Pivô Central (b), Cultivo (c) e Corpo Hídrico (d).



**Fonte:** Autor, 2023.

A segunda classe de uso mais expressiva na bacia é a Formação Florestal, que se estende ao longo de todo o curso do Córrego Marinheiro, desde o terço inferior até os ambientes próximos às nascentes, no terço superior da bacia. De acordo com o Sistema Nacional de Cadastro Rural, essa classe corresponde a 227 hectares nas áreas de Reserva Legal das 47 propriedades rurais cadastradas no sistema (Sicar, 2024). No entanto, há uma ausência de cadastros ambientais no interior da bacia, o que limita a capacidade de aferição dos hectares remanescentes, impossibilitando afirmar se a maior parte das áreas de formação florestal são originárias das Reservas Legais, conforme exigido pelo Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012).

No entanto, além das regulamentações federais, há a implementação da Área de Preservação Ambiental (APA) do Córrego Marinheiro como instrumento de política ambiental municipal que tem por objetivo proteger o patrimônio natural e proporcionar maior controle sobre as pressões antrópicas exercidas ao longo da bacia hidrográfica, refletindo sua influência nos processos de conservação ambiental (Sete Lagoas, 2019), contribuindo dessa maneira para uma possível conservação desta cobertura. A classe de formação florestal pode ser observada desde o alto curso da bacia até os ambientes próximos ao exutório (Figura 7a e 7b), o que pode ser um indicativo da efetividade destas ferramentas administrativas de conservação e proteção ambiental.

**Figura 7** - Classe de Formação Florestal (a) consolidada no terço inferior da bacia, entre os campos experimentais da EMPRABA; (b) Classe de Formação Florestal observada ao fundo da imagem, situada ao longo de um morro, recobrendo as duas vertentes no interior de uma propriedade privada



**Fonte:** Autor, 2023.

A presença de pequenos sítios e chácaras no terço superior da bacia é determinante para a consolidação da área urbana nessa porção, sendo identificada em pontos bem delimitados. Por outro lado, no terço inferior da bacia, observa-se uma parcela urbana do município de Sete Lagoas que está inserida no interior dessa área hidrográfica. Conforme a análise de uso e cobertura realizada e em concordância com Monteiro (2018), as atividades agropecuárias predominam ao longo da bacia, além de algumas áreas urbanas em estágio inicial de desenvolvimento.

Adicionalmente, é importante destacar que a totalidade da bacia está inserida no limite de abrangência da Área de Proteção Ambiental do Marinheiro (APA Marinheiro). Entre as fitofisionomias presentes no território da APA, destaca-se a ocorrência do Faveiro-de-Wilson (*Dimorphandra wilsonii* Rizzini), uma espécie arbórea da família Fabaceae. Essa espécie está listada pela União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN) como ameaçada de extinção (Fernandes, 2006). No estudo conduzido por Pereira (2018), foram identificados vinte

indivíduos dessa espécie no interior da bacia hidrográfica, todos localizados em áreas de pastagem.

Nesse contexto, ao considerar os instrumentos jurídicos relacionados à consolidação de Áreas Prioritárias para a Conservação da Biodiversidade, definidos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA) (Brasil, 2018), verifica-se que as fitofisionomias da região são caracterizadas como um ecótono. Esse ecótono representa uma zona de transição entre os biomas Cerrado e Mata Atlântica, característica que permite avaliar a região sob a perspectiva da jurisdição estabelecida pelo MMA (Araújo *et al.*, 2017).

De forma geral, as Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade Brasileira, especialmente aquelas que abrigam espécies ameaçadas de extinção, têm como objetivo orientar políticas públicas, programas e projetos de conservação em âmbito nacional, visando à redução do risco de extinção de espécies da flora (Loyola *et al.*, 2005). Nesse sentido, a bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro pode ser enquadrada nessa categoria, dada suas características ecológicas e a presença de espécies ameaçadas.

Entretanto, de acordo com as delimitações estabelecidas pela Comissão Nacional da Biodiversidade (Conabio), com base na Portaria n.º 463 de 18 de dezembro de 2018, a parcela do território que abrange a bacia hidrográfica em questão, localizada no município de Sete Lagoas, é classificada como uma área de Moderada Prioridade. Essa categorização contrasta com os aspectos definidos pela própria deliberação, que, além da proteção de espécies da flora, estabelece como objetivo central a recuperação de áreas degradadas.

Embora os processos de degradação não sejam visivelmente intensos em análises pontuais no tempo, Salis *et al.* (2020) destacaram que o histórico de uso e ocupação do solo, marcado por práticas agropecuárias intensivas e sem intervenções adequadas, contribuiu significativamente para a intensificação da erosão hídrica. Esse processo resultou no assoreamento do leito principal e no desaparecimento de nascentes, causados pelo rebaixamento progressivo do nível freático devido à ausência de manejo apropriado. Essas observações também foram registradas por Araújo *et al.* (2017) durante a elaboração de um inventário florestal abrangendo todo o município, no qual os autores identificaram uma ampla antropização das vegetações naturais, promovida tanto pela expansão de pastagens quanto pela consolidação da infraestrutura urbana.

No entanto, esse cenário de transição não é exclusivo da área estudada, sendo igualmente observado em outras regiões do Brasil (Lapig, 2023; Oliveira *et al.*, 2023; Moura *et al.*, 2024b; Bolfe *et al.*, 2024) e em escala global. De acordo com a FAO (2022), em um

panorama global, entre 1992 e 2019, as alterações antrópicas na superfície terrestre transformaram aproximadamente 60 milhões de hectares, destacando-se o aumento das áreas destinadas ao cultivo agrícola e às pastagens, em detrimento das florestas nativas. No Brasil, atualmente, as áreas de pastagem ocupam cerca de 167 milhões de hectares, sendo que 60% dessas apresentam algum grau de degradação (Bolfe *et al.*, 2024).

Com essa conjuntura, no caso da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, torna-se extremamente necessária a adoção de um manejo adequado para a conservação dos recursos naturais presentes. Entretanto, de acordo com o Zoneamento Ecológico e Econômico do município, foi aprovada a possibilidade de parcelamento do solo no interior da unidade territorial em lotes de no mínimo 1.000 m<sup>2</sup> (Sete Lagoas, 2022). Essa medida tende a resultar em uma significativa fragmentação da bacia, que, conforme descrito por Pereira (2023b), deverá ocorrer nos próximos anos ou décadas, aumentando a pressão sobre os exemplares do Faveiro-de-Wilson (*Dimorphandra wilsonii* Rizzini) e promovendo a intensificação da degradação dos solos.

Essa situação reforça o apontado por Figueiredo *et al.* (2017), que destacam a maior vulnerabilidade de unidades de conservação próximas a áreas urbanas a impactos ambientais e diversas pressões. No caso da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, os recursos naturais podem ser significativamente afetados. Para implementar mudanças que atendam aos usos conservacionistas, torna-se indispensável o desenvolvimento de políticas públicas integradas, que abordem aspectos inter-relacionados e contribuam para uma organização mais eficiente do uso do solo nos âmbitos local e regional. Além disso, essas políticas devem promover a recuperação e a conservação ambiental, que só serão alcançadas com a realização de estudos integrados que busquem compreender o comportamento do ambiente diante das ações antrópicas e embasar estratégias de gestão sustentável (Costanza *et al.*, 2016; Moura *et al.*, 2024a).

### 2.3.2 Potencial de Uso Conservacionista (PUC) e Matriz PUC

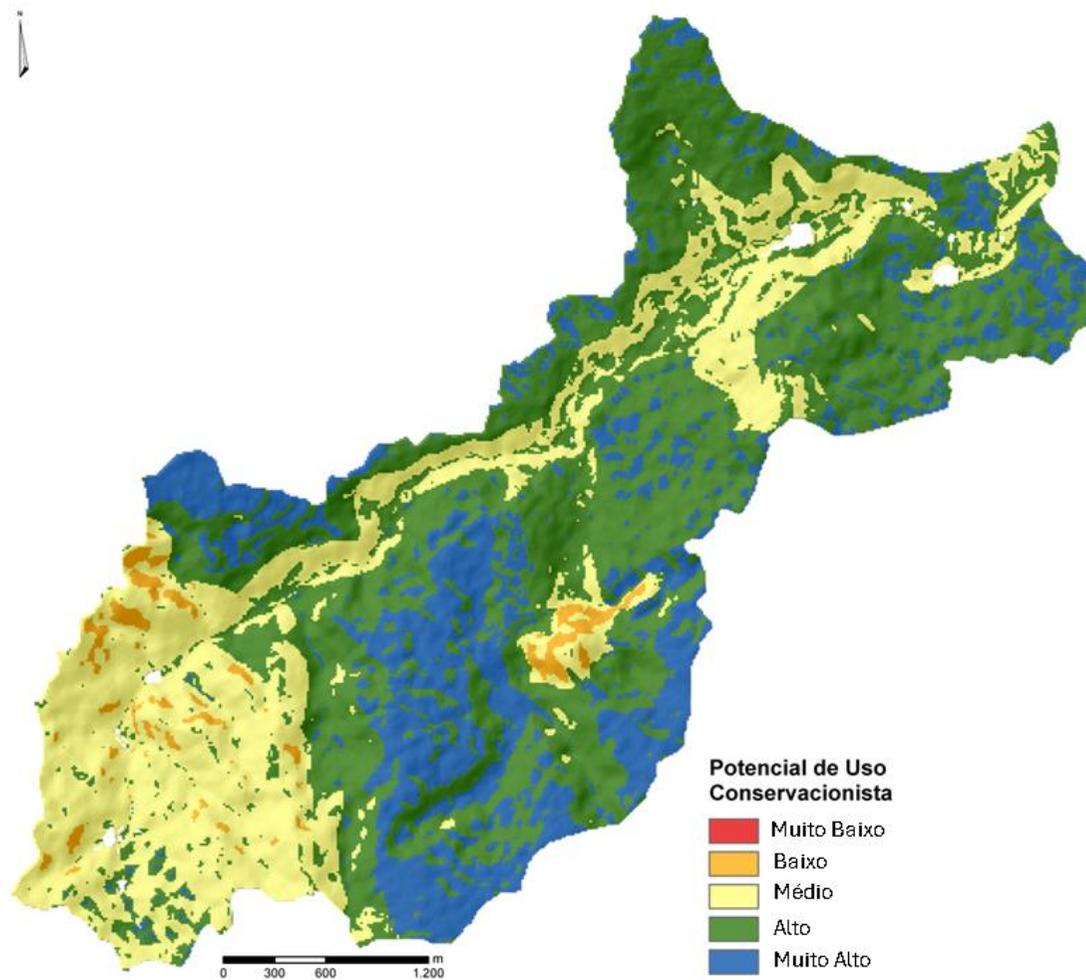
Na aplicação do modelo PUC, as características físicas do meio natural identificadas são observadas na Tabela 2 e Figura 8.

**Tabela 2** - Resultado do Potencial de Uso Conservacionista

<b>Muito Baixo</b>		<b>Baixo</b>		<b>Médio</b>		<b>Alto</b>		<b>Muito Alto</b>	
Há	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
0,01	0,06	26,94	1,85	440,25	30,38	692,19	47,77	289,58	19,98

Fonte: Autor, 2024

**Figura 8** - Mapa do Potencial de Uso Conservacionista<sup>3</sup>



**Fonte:** Autor, 2024.

<sup>3</sup> As áreas em branco em algumas partes da imagem são corpos d'água.

As classes PUC refletem os constituintes naturais da bacia hidrográfica, sendo predominantes ambientes com “alto” e “muito alto” PUC. Estes conferem à bacia uma maior capacidade de suportar diversas intervenções e oferecer uma ampla variedade de serviços ecossistêmicos, apenas com a devida conservação do ambiente (Costa *et al.*, 2019b). Em consonância, observa-se a expressividade dos ambientes com Médio PUC, que, com manejos e intervenções adequadas, podem promover inúmeros benefícios ao ambiente, dentro de suas limitações.

Analisando de maneira individual cada área da bacia em seu respectivo PUC, é notável que os ambientes de Alto PUC são os que predominam ao longo de toda a unidade territorial, estando concentrados inclusive nos ambientes de Latossolos e Nitossolos sobre um relevo suave ondulado. Conforme Costa *et al.* (2018), estas classes de solo favorecem os processos de infiltração e percolação da água por sua boa estruturação e porosidade que, somada às formas mais suaves do relevo, intensificam os processos de infiltração e movimentação da água no solo. Neste arranjo, o ambiente torna-se favorável tanto para ações conservacionistas quanto para mecanismos de produção agropecuária, por conta do relevo suave e da boa organização do sistema pedológico para suportar tanto o gado quanto possíveis culturas.

Além disso, o ambiente litológico que se encontra como substrato para toda essa organização é formado por calcários e siltitos, ambas litologias de origem sedimentar apresentando elevado potencial de fornecimento de nutrientes e menor resistência ao intemperismo, como observado em literatura (Cesare *et al.*, 2015; Aguiar *et al.*, 2016; Fachetti *et al.*, 2016; Navarro *et al.*, 2017).

Contudo, mesmo sobre os mesmos substratos litológicos, com a modificação da declividade ocorre o aumento do PUC em ambientes sobre Latossolos com relevo majoritariamente plano, e quando essa modificação ocorre com o aumento do declive e a mudança das classes de solo, há a presença das áreas de Médio e Baixo PUC. Essa observação pode ser contemplada no terço médio à inferior da bacia hidrográfica, em que nas áreas de Médio e Baixo PUC encontramos relevo suave ondulado associado a Argissolos, Cambissolos e Chernossolos.

Essa alternância ocorre porque os Cambissolos possuem um menor nível de desenvolvimento de suas estruturas pedológicas, o que dificulta a infiltração e a movimentação hídrica no interior do perfil, aumentando sua susceptibilidade à erosão (Pires, 2016), principalmente quando associados a um relevo movimentado. Em consonância, os Argissolos, mesmo sendo bem desenvolvidos, apresentam uma concentração de argila em subsuperfície,

reduzindo a capacidade de desenvolvimento de raízes profundas e infiltração da água, aumentando o escoamento superficial (Oliveira, 1972). Os Chernossolos, apesar de serem solos férteis, estão localizados em áreas de relevo forte ondulado e, portanto, a sua potencialidade se torna limitada em função da maior declividade, sendo a área classificada como de “baixo” PUC. Estas características favorecem a erosão hídrica e a redução tanto dos potenciais de recarga hídrica quanto dos potenciais de uso agropecuário. No curso superior da bacia, a litologia é composta por granito-gnaiss do complexo Belo Horizonte, com uma composição rica em quartzo e feldspato (Sampaio *et al.*, 2016), e conseqüentemente, resistente ao intemperismo e de baixa disponibilidade de nutrientes. Por sua maior resistência ao intemperismo em relação ao calcário e ao siltito, essa área concentra as maiores declividades da bacia. Em associação a essa movimentação do relevo, a classe predominante é composta por classes pouco desenvolvidas pedologicamente, como os Cambissolos e Neossolos, além da presença dos Luvisolos, que apresentam limitações de drenagem.

Essa combinação de declividade acentuada, classes pedológicas de menor desenvolvimento e limitações naturais reduz os potenciais de uso conservacionista (PUC), resultando em uma predominância de ambientes de “baixo” e “médio” PUC. Isso porque áreas de relevo movimentado, com solos de frágil organização estrutural, são desfavoráveis aos processos de infiltração e retenção de água, pois a maior inclinação do relevo reduz o tempo de permanência de água sobre o solo, promovendo o fluxo de água superficial bem como o carreamento de sedimentos, além de limitar a realização de práticas agrícolas (Pereira *et al.*, 2018; Costa *et al.*, 2019a; Tenenwurcel *et al.*, 2020). No entanto, devido à diversidade do relevo, há pontos específicos onde o terreno se caracteriza como plano, favorecendo ambientes de “alto” e “muito alto” PUC mesmo sobre solos com menor desenvolvimento pedológico.

Com essa organização, a análise dos processos que podem otimizar o ambiente adquire um caráter amplo, especialmente ao considerar os benefícios que podem ser alcançados com o uso adequado do território. Nesse contexto, ao focar nos aspectos que influenciam os movimentos hídricos, torna-se possível identificar os ambientes mais adequados para a prestação de serviços ecossistêmicos hídricos, estando alinhados com base na organização dos atributos envolvidos pelo método na consolidação do processo de recarga hídrica.

Todavia, é importante salientar que o método PUC traz o conceito de recarga hídrica como a retenção hídrica ao longo do ambiente microporoso do solo, consolidado ao longo de atributos específicos como estrutura, textura e profundidade efetiva (Costa *et al.*, 2018). Com essa leitura, a água que se infiltra ao longo da superfície é conduzida ao longo do sistema

macroporoso e passa a ser armazenada nos microporos do solo por forças capilares, sendo disponibilizadas para as plantas e promovendo o possível reabastecimento dos níveis freáticos, dando prosseguimento às dinâmicas naturais do ambiente.

Dessa maneira, observando os resultados propostos pelo método, os ambientes mais propícios para que estas situações ocorressem são justamente as áreas de “alto” e “muito alto” PUC, justamente por toda a organização ambiental presente nestes ambientes. Mesquita e Morais (2004) indicaram justamente que a condutividade hidráulica, que é a capacidade da água se movimentar ao longo do solo depois da infiltração, mostra-se mais dependente da estrutura do que da textura do solo. Essa afirmação vai de encontro às características das classes observadas, onde há alta porosidade e permeabilidade, mesmo quando apresentam altos teores de argila, pois apresentam maior estabilidade estrutural que favorece a movimentação hídrica interna (Ferreira *et al.*, 1999; Silva *et al.*, 2003; Silva *et al.*, 2014).

Pereira *et al.* (2018) destacam que os serviços ecossistêmicos (SE) prestados pelo solo dependem das características naturais do ambiente. A partir desta concepção, os ambientes indicados como Alto e Muito Alto PUC mostram-se, em sua natureza, capazes de promover a prestação de serviços ecossistêmicos hídricos. Contudo, não é possível afirmar quais serviços ecossistêmicos estes ambientes são capazes de prover de maneira sustentável, sendo assim fundamental equalizar os ganhos e as possíveis perdas ao se adotar determinado planejamento do território na busca por serviços ecossistêmicos (Moura, 2023).

Dessa maneira, observa-se que a partir da compreensão do ambiente podem surgir amplas possibilidades frente à prestação de serviços ecossistêmicos, mas nem todos podem ser compatíveis com os objetivos. O uso agropecuário, predominante na área de estudo, apesar de se relacionar com o ambiente de modo colaborativo, pode alterar a dinâmica e a provisão de diversos SE com a adoção de manejos inadequados, onde não há ações conservacionistas (Pereira *et al.*, 2018). Dessa forma, compreender o meio natural, bem como as modificações propostas e impostas pelos seres humanos, é de extrema necessidade para alcançar a sustentabilidade do ambiente. Assim, os resultados do PUC foram interseccionados com as classes de uso e cobertura do solo, consolidando a Matriz PUC (Tabela 3).

**Tabela 3 - Matriz PUC**

	<b>Matriz PUC</b>				
	<b>Muito Baixo</b>	<b>Baixo</b>	<b>Médio</b>	<b>Alto</b>	<b>Muito Alto</b>
	Hectares				
<b>Água</b>	-	-	0,9	0,5	-

<b>Cultivo</b>	-	-	1,9	9,1	2,0
<b>Formação Florestal</b>	0,01	24,4	273,7	254,6	45,3
<b>Pastagem</b>	-	2,5	148,0	370,6	215,6
<b>Área Urbana</b>	-	-	0,1	2,6	1,1
<b>Área Irrigada</b>	-	-	-	13,8	10,1
<b>Silvicultura</b>	-	-	-	1,6	0,3

Fonte: Autor, 2024.

Parte considerável da área de estudo é classificada como Pastagem e Formação Florestal (Tabela 1). Cerca de 41% das áreas de formação florestal estão associadas a áreas de “alto” PUC, consolidando condições favoráveis à recarga hídrica. Estudos anteriores apontaram que a presença de formações florestais contribui significativamente para a recarga hídrica (Tenenwurcel *et al.*, 2020; Mucida *et al.*, 2023). Além disso, 44% das áreas de formação florestal estão situadas em áreas de “médio” PUC, um dado relevante, pois, mesmo diante das limitações naturais desses ambientes, a cobertura florestal atual potencializa os processos de recarga hídrica, favorecendo a provisão de serviços ecossistêmicos hídricos (SEH). Essa contribuição também se estende às áreas de “baixo” e “muito baixo” PUC, que são mais vulneráveis a processos de degradação (Costa *et al.*, 2019a). Dessa forma, as formações florestais desempenham um papel essencial na prestação de serviços ecossistêmicos hídricos e outros serviços relacionados, como conservação da biodiversidade, provisão de alimentos, regulação climática e controle da erosão (Tenenwurcel *et al.*, 2020; Mucida *et al.*, 2023; Moura *et al.*, 2024b).

Nas áreas de Pastagem, a classe predominante da bacia apresenta suas maiores extensões ao longo das regiões de Médio, Alto e Muito Alto PUC, concentrando-se em sua maioria nas áreas com a presença de Latossolos, ambiente que se mostrou ideal para a prestação de SEH. Nesta organização, torna-se fundamental a interpretação cunhada por Moura *et al.* (2023):

Entender quais serviços são ou não englobados nas análises voltadas para a temática dos SE auxilia no entendimento de que a gestão do SE pode ser pautada na análise de sinergias e *trade-offs*, equalizando os ganhos conjuntos e as possíveis perdas em se adotar determinado planejamento do território (p.63).

Isso porque nesses ambientes, caso as diretrizes de organização territorial prossigam com as atividades pecuárias, é obrigatório que as pastagens estejam em situações adequadas quanto ao manejo, visando uma conservação das potencialidades naturais do ambiente que podem ser comprometidas com o processo de pastejo do gado (Cardoso *et al.*, 2011; Bonetti, 2019; Santana, 2023). Isso porque a gestão inadequada é responsável pela perda gradual, tanto

da capacidade produtiva quanto da qualidade dos recursos hídricos, ocorrida pela remoção e transporte de sedimentos (Perazzoli *et al.*, 2013; Pereira *et al.*, 2018).

Ao se tratar dos usos agropecuários, o manejo é o ponto principal para equalizar o balanço entre os processos de conservação e degradação, sendo ele o divisor de águas entre a continuidade e potencialidade na prestação dos SEH ou à sua gradual redução. Desta forma, a gestão efetiva do território deve ir além de debates acerca de territórios destinados à conservação ou a produção, mas sim orquestrada a partir de características chave quanto ao potencial de prestação de SE (Tschardtke *et al.*, 2012), o que requer ferramentas integradas e de amplo alcance.

#### **2.4 Considerações finais**

A organização territorial da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro evidencia os impactos negativos das pressões antrópicas que se acumularam ao longo do tempo, especialmente pelo histórico de uso do solo que comprometeu sua dinâmica hídrica. A predominância de áreas de pastagem acende um alerta quanto à necessidade de fiscalização frente às práticas de manejo empregadas, visando a conservação dos recursos naturais como solo e água.

Além disso, a vulnerabilidade da bacia foi agravada com a flexibilização da legislação que regula a APA Marinheiro, permitindo a expansão de infraestruturas urbanas dentro do território. Tal cenário pode favorecer economicamente a comercialização de terrenos em detrimento das dinâmicas produtivas tradicionais, promovendo a conversão de áreas produtivas em ambientes urbanos. Essa conversão, por sua vez, resultaria em maior escoamento superficial devido à impermeabilização do solo, reduzindo a infiltração da água da chuva e comprometendo os processos hídricos naturais, como a recarga. No entanto, por ser recente, os impactos dessa flexibilização no Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do município ainda são especulações.

Pode-se observar que as alterações na organização territorial podem comprometer áreas previamente reconhecidas como ambientes ótimos para a prestação de serviços ecossistêmicos hídricos. Essas áreas podem sofrer tanto pelo manejo inadequado das pastagens, que levaria à compactação do solo, quanto pela consolidação de infraestruturas urbanas que provocaram a supressão de processos naturais. Embora a urbanização possa beneficiar o município com maior arrecadação tributária, as áreas agropecuárias bem manejadas adequadamente oferecem

vantagens ecológicas significativas, como maior biodiversidade e melhores condições para a recarga hídrica.

Portanto, mesmo que sejam realizados estudos detalhados sobre os serviços ecossistêmicos prestados pela bacia, a sustentabilidade ambiental dependerá de uma gestão territorial eficiente. É essencial alinhar os elementos naturais e culturais da paisagem, além de restringir a conversão desordenada de áreas rurais em urbanas. Caso contrário, o sistema ambiental estará em risco, caminhando para a insustentabilidade.

## **2.5 Conclusões**

- A maior parte da bacia do Córrego do Marinheiro apresenta Alto a Muito Alto Potencial de Uso Conservacionista.
- Os usos predominantes na bacia são de Formação Florestal e pastagem, em áreas de PUC Alto e Muito Alto.
- A bacia apresenta alto potencial para a prestação de serviços ecossistêmicos, cuja provisão deve ser otimizada com a implementação de práticas de manejo e conservação dos solos adequados.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **ODS 6 no Brasil: Visão da ANA sobre os indicadores**. Brasília: ANA, 2019.
- AGUIAR, M. C.; SILVA, A. G. P.; GADIOLI, M. C. B. Caracterização de resíduo de mármore para fabricação de rocha artificial. Anais 22º CBECiMat - **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**. Natal, p. 939-950, 2016.
- ALSDORF, D. E.; RODRÍGUEZ, E.; LETTENMAIER, D. P. Measuring surface water from space. **Reviews of Geophysics**, n.º 45, RG2002, 2007
- ANDRADE, C. A. O.; SILVA, G. C.; CORRÊA, M. C.; COLLIER, L. S.; CORRECHEL, V. Condutividade hidráulica e atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob sistemas de manejo no Cerrado Goiano. **Agrarian, Dourados**. v.13, n. 49, p. 385-392. 2020.
- ALASKA SATELLITE FACILITY – ASF. **Radiometrically Terrain Corrected ALOS PALSAR products** - Product guide. Alaska, 2015. ed. 2., 12p.
- ARAÚJO, S. N.; SILVA, A. F.; COSTA, T. C. C. DA; PEREIRA, M. P. R.; RABELO, M. F. R. Preference of tree species for tropical forest environments. **Applied Ecology and Environmental Research**, v. 15, n. 1, p. 717–742, 2017.
- BARBOSA, E. H. B.; SAKAMOTO, A. Y.; BACANI, V. M. Proposta de zoneamento ambiental para a bacia transfronteiriça do rio Apa. **Interações (Campo Grande), Campo Grande**, v. 17, n. 2, p. 210-222. 2016.
- BOLFE, E. L.; VICTORIA, D. C.; SANO, E. E.; BAYMA, G.; MASSRUHÁ, S. M. F. S.; OLIVEIRA, A. F. Potential for Agricultural Expansion in Degraded Pasture Lands in Brazil Based on Geospatial Databases. **Land**, v. 13, 2024.
- BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; MORAES, M. T.; Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**. v. 186, p. 280-291. 2019
- BRASIL. **Lei n.º 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, Brasília, DF. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/19433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/19433.htm)>. Acesso em 10 de mai. 2023.
- BRASIL. **Lei no 12.651, de 25 de maio de 2012. Diário Oficial da União**, Brasil, 2012.
- BRASIL. **Portaria no 463, de 18 de dezembro de 2018 - Ministério do Meio Ambiente**. Brasil, 2018.
- BRAUMAN, K. A.; DAILY, G. C.; DUARTE, T. K. E. O.; MOONEY, H. A. The nature and value of ecosystem services: an overview highlighting hydrologic services. **Annual Review of Environment and Resources**, v. 32, p. 67–98, 2007.

- CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal sul-mato-grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 613–622, 2011.
- CESARE, B; ACOSTA-VIGIL, A; BARTOLI, O; FERRERO, S. What can we learn from melt inclusions in migmatites and granulites? **Lithos, Amsterdam**, v.239, p.186–216. 2015.
- COELHO, A. L. N. **Alterações Hidrogeomorfológicas no Médio-baixo Rio Doce** / ES. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal Fluminense, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007, 227p.
- COSTA, A. M.; VIANA, J. H. M.; EVANGELISTA, L. P.; DE CARVALHO, D. C.; PEDRAS, K. C.; HORTA, I. DE M.; DE SALIS, H. H. C.; PEREIRA, M. P. R.; SAMPAIO, J. L. D.; UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS. Ponderação de variáveis ambientais para a determinação do Potencial de Uso Conservacionista para o Estado de Minas Gerais. **GEOgrafias**, v. 14, p. 118–134, 2018.
- COSTA, A. M. et al. Potencial de uso conservacionista em bacias hidrográficas: estudo de caso para a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte - MG. **GEOgrafias**, v. 27, n. 2, p. 127–147, 2019a.
- COSTA, A. M.; DE SALIS, H. H. C.; ARAÚJO, B. J. R. S.; DE MOURA, M. S.; DA SILVA, V. C.; DE OLIVEIRA, A. R.; PEREIRA, M. P. R.; VIANA, J. H. M. Potencial de uso conservacionista em bacias hidrográficas: estudo de caso para a bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte - MG. **GEOgrafias**, v. 27, p. 127–147, 2019b.
- COSTA, A. M. et al. Potencial de Uso Conservacionista (PUC) e Uso e ocupação da terra na Bacia Hidrográfica do Córrego Guavirá, PR. **Perspectiva Geográfica**, v. 14, n. 20, p. 107–122, 2019c.
- COSTA, A. M.; ARAÚJO, B. J. R. S.; MOURA, M. S.; SILVA, V. C.; DEBONA, B. G.; JARDIM, H. L.; MENDES, I. A. S.; GIANASI, L. M.; PEREIRA, M. P. R.; MOTA, P. K.; NÓBREGA, R. A. A.; ASSAD, T. F. **Zoneamento Ambiental e Produtivo: Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jequitibá-MG**. Belo Horizonte, 2022.
- COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; VAN DER PLOEG, S.; ANDERSON, S.J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global. Environmental Change**. v. 26, p. 152–158. 2016.
- CRUZ, Z. Q., RIBEIRO, G. P. Ensaio de Segmentação e Classificação Digital de Imagens CBERS Utilizando o Sistema Spring em uma Unidade de Conservação Ambiental, Estudo de Caso: Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO). **II Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação**, UFPE, Recife - PE. 8 de set. de 2008.
- DIAS-FILHO, M. B. Degradação de pastagens: o que é e como evitar. EMBRAPA. 2017.
- EUROPEAN SPACIAL AGENCY - ESA. **Sentinel-2 Mission Imagery**. USGS, Science for a changing world, 2018. DOI: doi.org/10.5066/F76W992G.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE – ESRI. DeLorme Publishing Company, **CIA World Factbook**, 2020. World Countries (base digital georreferenciada). Califórnia, Estados Unidos da América.

FACHETTI, F. J. S.; COSTA, A. C. D. da; SILVA, C. H. da. Magmatismo cálcio-alcálico Calimiano no embasamento do Terreno Jauru (Província Rondoniana–San Ignácio), Cráton Amazônico: geoquímica e geocronologia Sm-NdEU/Pb. **Brazilian Journal of Geology**, São Paulo, v. 46, n.º.1, p.109-128. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS - FAO. **The state of the world's land and water resources for food and agriculture 2021 - Systems at breaking point. Main Report.** Rome. 2022.

FERNANDES, F. F. **Dimorphandra wilsonii**. Belo Horizonte, 2006.

FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 507–514, 1999.

FIGUEIREDO, H. P. DE; OLIVEIRA, M. A. C. DE; BARROS, J. H. DE SOUZA; COSTA, R. B. D. A. Políticas Públicas e fragilidades na gestão de Unidades de Conservação Urbanas no Brasil. **Multitemas**, v. 22, n. 51, 16, 2017.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de texto. 160 p. 2008.

FREITAS, L. D.; DE MORAES, J. F. L.; DA COSTA, A. M.; MARTINS, L. L.; SILVA, B. M.; AVANZI, J. C.; UEZU, A. How far can nature-based solutions increase water supply resilience to climate change in one of the most important Brazilian watersheds? **Earth** (Switzerland), v. 3, p. 748–767, 2022.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, p. 121–145, 2005.

KOSMAS, C.; GERONTIDIS, S.; MARATHIANOU, M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece). **Catena**, v. 40, p. 51–68. 2000.

LABORATÓRIO DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E GEOPROCESSAMENTO – LAFIG. **Atlas das Pastagens**, 2023.

LOYOLA, R.; MARTINS, N. MACHADO DANIELE VILA NOVA ELINE; MARTINELLI, G. **Áreas Prioritárias Para Conservação E Uso Sustentável Da Flora Brasileira Ameaçada De Extinção**. 1º ed. Rio de Janeiro: 2005.

MACDONALD, D.; CRABTREE, J.R.; WIESINGER, G.; DAX, T.; STAMOU, N.; FLEURY P. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. **Journal Environmental Management**, v. 59, p. 47–69. 2000.

MACEDO, M. C. M.; ZIMMER, A. H.; KICHEL, A. N.; ALMEIDA, R. G.; ARAUJO, A. R. Degradação de pastagens, alternativas de recuperação e renovação, e formas de mitigação. *In:*

- ENCONTRO DE ADUBAÇÃO DE PASTAGENS DA SCOT CONSULTORIA - TEC - FÉRTIL, 1., 2013, Ribeirão Preto, SP. **Anais**. Bebedouro: Scot Consultoria, 2013. p. 158-181.
- MELLO, K.; TANIWAKI, R. H.; PAULA, F. R.; VALENTE, R. A.; RANDHIR, T. O.; MACEDO, D. R.; LEAL, C. G.; RODRIGUES, C. B.; HUGHES, R. M. Multiscale land use impacts on water quality: assessment, planning, and future perspectives in Brazil. **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110879, 2020.
- MENDES, I. A. S. O uso de geotecnologias na organização do espaço. **Cadernos do Leste – Artigos Científicos**. Belo Horizonte. v.19, n.º 19, p. 35-50, 2019.
- MENDES, I. A. S.; COSTA, A. M. Mudança temporal no uso e cobertura da terra na Bacia do Alto Rio das Velhas. **RA’EGA**, v. 55, 2022.
- MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n.3, p. 963-969, 2004.
- MONTEIRO, H. C. **Uso da terra e variações de temperatura e umidade relativa do ar na bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas-MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2016, 138 f.
- MOURA, M. S. M. **Avaliação da dinâmica de provisão de serviços ecossistêmicos múltiplos no alto curso do Rio das Velhas, MG**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- MOURA, M. S.; CORDEIRO, V. C.; FERREIRA, A. M.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L.F. S.; PISSARRA, T. C. T.; COSTA, A. M. Integrating policy, data and technology in pursuing effective management of ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v. 368, p. 122157, 2024a.
- MOURA, M. S.; SILVA, V. C.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T.; COSTA, A. M. Beyond land use planning and ecosystem services assessment with the conservation use potential framework: A study in the Upper Rio das Velhas basin, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 923, p. 171437. 2024b.
- MUCIDA, D. P.; GORGENS, E. B.; RECH, A. R.; CHRISTOFARO, C.; DA SILVA, R. S.; PEREIRA, I. M.; DE MORAIS, M. S.; DA COSTA, A. M.; FRANÇA, L. C. DE J. Designing optimal agrosilvopastoral landscape by the potential for conservation use in Brazil. **Sustainable Horizons**, v. 5, p. 100045, 2023.
- NAVARRO, G. R. B.; ZANARDO, A.; MONTIBELLER, C. C.; CONCEIÇÃO, F. T.; VALERIANO, C. M.; LEME, T. G.; SIMÕES, L. S. A. Proveniência dos metassedimentos do grupo Araxá na região de Caldas Novas, Goiás. **Geociências**, São Paulo, v. 36, nº. 2, p. 395 -413, 2017.
- OLIVEIRA, J. B. Fatores de Formação do solo *In*: MONIZ, A. C. Elementos de Pedologia. Editora Polígono, São Paulo, 1972.

OLIVEIRA, A. R.; PACHECO, F.A.L, FERNANDES, L.F.S.; COSTA, A. M. Trends of potentially illegal deforestation over protected areas of Rio das Velhas basin, Brazil. **Land Degradation e Development**, v. 34, p. 4649–4666, 2023.

OLIVEIRA, A. R. de. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de pós-graduação em Geografia. IGC-UFMG. 2016, 74 f.

O’RIORDAN, R.; DAVIES, J.; STEVENS, C.; QUINTON, J.N.; BOYKO, C. The ecosystem services of urban soils: a review. **Geoderma**, v. 395. 2021

PERAZZOLI, M.; PINHEIRO, A.; KAUFMANN, V. Efeitos de cenários de uso do solo sobre o regime hídrico e produção de sedimentos na bacia do Ribeirão Concórdia - SC. **Revista Árvore**, v. 37, p. 859–869, 2013.

PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUÑOZ-ROJAS, M; BREVIK, E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, v. 5, p. 7–13, 2018.

PEREIRA, M. P. R. **Geotecnologias e análise urbana: possibilidades e limitações analíticas a partir do desenvolvimento urbano ambiental do município de Sete Lagoas**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023a.

PEREIRA, M. P. R. **Análise do ambiente e modelagem da favorabilidade de ocorrência do Faveiro-De-Wilson (*Dimorphandra wilsonii rizzini*) Hidrológica para a Bacia Hidrográfica do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas - MG**. 54p. Dissertação de Mestrado - Programa de pós-graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais. IGC-UFMG. 2018.

PIRES, C. V. **Dinâmica hídrica de uma sequência latossólica sob pastagem em bacia hidrográfica da zona da mata mineira**. Tese apresentada (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2016

PIROLI, E. L. **Introdução ao geoprocessamento**. Ourinhos: Unesp/*Campus* Experimental de Ourinhos, 2010.

PIROLI, E. L.; LEVYMAN, L. A. Mudanças no uso da terra em microbacias hidrográficas urbanas com geotecnologias. **Geografía y Sistemas de Información Geográfica**, v. 17, p. 1-15, 2020.

SALIS, H. H. C.; COSTA, A. M.; VIANNA, J. H. M.; SCHULER, A. E. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do córrego do marinheiro, Sete Lagoas-MG. **Boletim de Geografia**, v. 37, n.2, p. 189-201. 2020.

SAMPAIO, J. D.; SILVA, S. A. M.; VIANA, J. H. M. V.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R. **Mapa litológico preliminar da bacia do córrego Marinheiro**. Belo Horizonte: [s.d.], 2016. Mapa litológico. Arquivos vetoriais armazenados em memória flash portátil. Não publicado.

SANTANA, M. L. T. **Soil health and ecosystem services related to water recharge in the cantareira system**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2023

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; dos ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIRDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F.; **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa. 5ª ed. 2018.

SETE LAGOAS. **Lei Complementar n.º 227**, de 4 de outubro de 2019. Diário Oficial do Município. Sete Lagoas, 2019.

SETE LAGOAS. **Lei Complementar n.º 227**, de 04 de outubro De 2019. Sete Lagoas. Diário Oficial do Município, 2022.

SISTEMA NACIONAL DE CADASTRO AMBIENTAL RURAL - SICAR. **Regularização Ambiental** - Cadastro Ambiental Rural, Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.car.gov.br/#/>. Acesso em: 21 abr. 2024

SILVA, B. M.; SILVA, E. A. DA; OLIVEIRA, G. C. DE; FERREIRA, M. M.; SERAFIM, M. E. Plant available soil water capacity: estimation methods and implications. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 464–475, 2014.

SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A.; RAUBER, J. C.; REATTO, A. Caracterização físico-hídrica e hidráulica de solos do bioma Cerrado submetidos a diferentes sistemas de preparo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, EMBRAPA, Planaltina, DF, 2003.

SOBRAL, M. do C.; LOPES, H.; CANDEIAS, A. L.; MELO, G.; GUNKEL, G. Geotecnologias na gestão de reservatórios: uma revisão e uma proposta de integração. **Eng. Sanit. Ambient.**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 5, p. 841-852. 2017.

TENENWURCEL, M. A. et al. An improved model for the evaluation of groundwater recharge based on the concept of conservative use potential: A study in the river Pandeiros Watershed, Minas Gerais, Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 4, 2020.

TSCHARNTKE T, P.; TYLIANAKIS, J. M.; TATYANA, A. R.; DIDHAM, R. K.; FAHRIG, L.; BATÁRA, P.; BENGTSSON, J.; CLOUGH, Y.; CRIST, T. O.; DORMANN, C. F. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes: eight hypotheses. **Biological Reviews**, 2012.

USGS - Science for a changing world. U.S. Department of the Interior. U.S. Geological Survey. Global Visualization Viewer - **GloVis**, 2017. Disponível em: <[glovis.usgs.gov](http://glovis.usgs.gov)>. Acessado em: 4 de jun. 2023.

### **3. CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA SATURADA: INTERPRETAÇÕES CONFORME OS HORIZONTES DO SOLO**

#### **RESUMO**

A dinâmica hídrica ao longo das classes de solo mostra-se amplamente variável em diferentes ambientes, principalmente em razão dos atributos genéticos e da organização interna do solo, fatores que afetam a regulação dos ecossistemas e a prestação de Serviços Ecossistêmicos Hídricos (SEH). Nesse sentido, a pesquisa realizada na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro teve como objetivo analisar a dinâmica hídrica em diferentes classes de solo, considerando os atributos físico-hídricos que influenciam a condutividade hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ) ao longo dos horizontes pedológicos das classes presentes na bacia, com amostras coletadas nos horizontes pedogenéticos A e B. As análises laboratoriais incluíram medições de  $K_{sat}$  com permeâmetros de carga constante. Os resultados obtidos permitiram identificar a influência dos processos pedogenéticos na consolidação dos atributos morfológicos do solo e na movimentação hídrica no solo. Os resultados mostraram que solos com estrutura bem desenvolvida apresentaram maior  $K_{sat}$ , favorecendo a recarga hídrica e a provisão de SEH, principalmente nos ambientes que apresentaram maiores teores de matéria orgânica. Esses resultados reforçam a necessidade de políticas públicas que incentivem práticas de manejo adequadas, contribuindo para a conservação dos recursos naturais e para a sustentabilidade dos ecossistemas na região. Além disso, os resultados por horizontes pedológicos apresentaram uma organização pedológica do perfil que não seria possível de ser avaliada caso as amostras fossem coletadas apenas nas camadas superiores dos perfis, avaliando apenas profundidades pré-estabelecidas. Uma abordagem ecossistêmica que desconsiderasse essa variabilidade poderia gerar interpretações equivocadas.

Palavras-chave: classes de solo; condutividade hidráulica saturada; serviços ecossistêmicos hídricos

## ABSTRACT

The hydrological dynamics across soil classes show significant variability in different environments, primarily due to their genetic attributes and the internal organization of the soil, which affect ecosystem regulation and the provision of Hydrological Ecosystem Services (HES). In this context, the research conducted in the Córrego Marinho watershed aimed to analyze the hydrological dynamics in different soil classes, considering the physical-hydraulic attributes that influence the saturated hydraulic conductivity (Ksat) across the pedological horizons of the soil classes present in the watershed, with samples collected from the A and B pedogenetic horizons. Laboratory analyses included measurements of Ksat using constant head permeameters. The results obtained helped identify the influence of pedogenetic processes on the consolidation of soil morphological attributes and water movement in the soil. The findings revealed that soils with well-developed structure exhibited higher Ksat, favoring water recharge and the provision of HES, particularly in environments with higher organic matter content. These results emphasize the need for public policies that promote adequate land management practices, contributing to the conservation of natural resources and the sustainability of ecosystems in the region. Furthermore, the results by pedological horizons highlighted a pedological organization within the soil profile that would not have been apparent if only samples had been collected from the upper layers of the profiles. Relying solely on predefined depths in an ecosystem-based approach could lead to misinterpretations regarding the soil's hydrological dynamics and its capacity to provide ecosystem services. In conclusion, the findings reinforce the importance of considering soil structure and depth variations when assessing hydrological services. A comprehensive evaluation, accounting for the heterogeneity of the soil profile, is crucial for making informed decisions regarding land management and the preservation of ecosystem services, especially in areas under significant anthropogenic influence.

Keywords: soil classes; saturated hydraulic conductivity; ecosystem services

### 3.1 Introdução

O solo é um sistema complexo onde atributos físicos, químicos e biológicos em associação consolidam-no como elemento essencial das atividades humanas, tanto para ações econômicas quanto para ambientais, tornando-se um componente central na regulação de ecossistemas (Saco *et al.*, 2021). A partir dele, é possível obter uma série de benefícios aos seres humanos a partir das dinâmicas ambientais, que foram categorizados como Serviços Ecossistêmicos (SE) (Costanza *et al.*, 2014; Costanza *et al.*, 2016; Haines-Young e Potschin, 2018).

No entanto, interferências antrópicas influenciam diretamente na qualidade dos serviços prestados pelo solo (Pereira *et al.*, 2018; O'Riordan *et al.*, 2021; Moura *et al.*, 2024b). Isso porque modificações indiscriminadas no uso e cobertura do solo provocam a degradação de funções ambientais exercidas pelo meio (MEA, 2005), especialmente no que diz respeito à disponibilidade de água (MacDonald *et al.*, 2000; Kosmas *et al.*, 2000; Hamza *et al.*, 2005). Em aspecto global, estima-se que 1/3 dos países terão perdas produtivas pela falta d'água e 3 milhões de pessoas irão sofrer com períodos de estresse hídrico nos próximos anos (Calicioglu *et al.*, 2019).

A partir da degradação dos recursos hídricos superficiais, a necessidade de uso das águas subterrâneas tem ganhado cada vez mais relevância (Scanlon *et al.*, 2006). Isso expõe a necessidade de conhecer melhor os Serviços Ecossistêmicos Hídricos (SEH) prestados pelo solo, pois ele é o meio principal pelo qual a água se movimenta até alcançar o nível freático e/ou ambientes subterrâneos. Assim, conhecer atributos do meio físico que influenciam na dinâmica hídrica no solo torna possível identificar os melhores ambientes para provimento de recursos hídricos, tanto em qualidade quanto em quantidade (Tenenwurcel *et al.*, 2020; Moura *et al.*, 2023).

Nesse sentido, estudos de atributos físico-hídricos dos solos são parte de uma abordagem ecossistêmica (Robinson *et al.*, 2014). A movimentação hídrica no interior das classes pedológicas é avaliada pela condutividade hidráulica (K), com valores máximos em estado de saturação (Ksat) (Libardi, 2000; Libardi; Gonçalves, 2013). Estrutura, porosidade e textura do solo são características genéticas que influenciam as leituras de Ksat obtidas (Sobieraj *et al.*, 2002; Mesquita; Moraes, 2004), proporcionando assim heterogeneidade de valores em literatura.

Porém, a maior parte dos estudos que envolvem a avaliação deste parâmetro está atrelada a objetivos agrônômicos, voltados para a otimização das áreas irrigáveis, garantindo

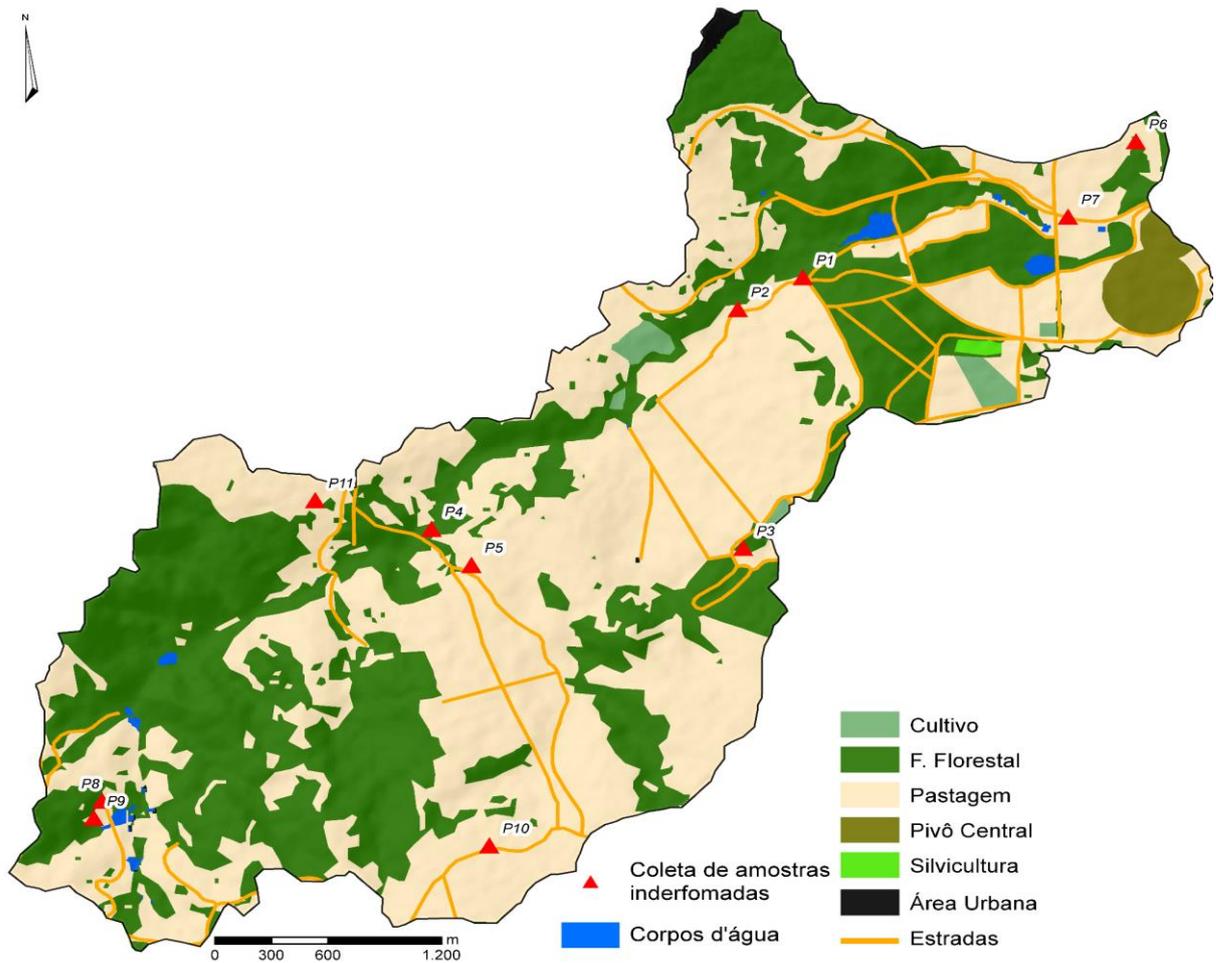
que a água esteja presente na região de crescimento das raízes (Hu *et al.*, 2009; Zeng *et al.*, 2013; Amaral, 2018). Assim, estes estudos não levam em consideração a organização vertical do solo, segmentada em horizontes, que são fundamentais para a sua categorização conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS).

Com isso, para compreender a dinâmica hídrica presente ao longo das classes de solo e os possíveis SE prestados por estes, o mais adequado é que a avaliação dos valores de Ksat seja realizada conforme os horizontes pedogenéticos utilizados na categorização, proporcionando um comportamento para a classe de solo. Neste intuito, este trabalho tem por objetivo aferir e avaliar os valores de Ksat ao longo dos horizontes A e B das classes de solo na bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro para compreender ambientes ótimos para a prestação de SEH.

### **3.2 Materiais e Métodos**

Para avaliação da condutividade hidráulica saturada, foram utilizados 11 perfis de solos (Figura 9) categorizados por Oliveira (2016), durante o levantamento pedológico em nível de semidetalhe (1:25.000).

**Figura 9** – Espacialização dos pontos amostrais na bacia hidrográfica Córrego do Marinheiro, MG.



Fonte: Autor, 2024

Os pontos de coleta constam de 5 classes de solos em primeiro nível categórico, que são: Argissolos, Cambissolos, Latossolos, Luvisolos e Nitossolos, e representam horizontes diagnósticos superficiais e subsuperficiais das classes descritas (Tabela 4). Ao longo destes perfis, coletaram-se amostras indeformadas com a utilização de cilindros volumétricos de aço inoxidável com dimensões conhecidas (50x50mm), um amostrador de alumínio e uma marreta de borracha. O processo de coleta foi realizado em três repetições, totalizando 66 amostras.

**Tabela 4** - Descrição dos pontos amostrais para a bacia do córrego do Marinheiro - MG

Ponto	Classe de solo	Sigla	Horizonte avaliado	Profundidade do horizonte (cm)	Uso e Cobertura do Solo
P1		PVA	Ap2	11 - 22	Pastagem

	ARGISSOLO VERMELHO- AMARELO Eutrófico nitossólico, A moderado		Bt1	22 - 48	
P2	LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico, A húmico	TX	Ap	0 - 26	Pastagem
			2Bt1	37 - 88	
P3	LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico, A proeminente	LV	A	0 - 38	Formação Florestal
			BA	38 - 92	
P4	NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico, A húmico	NX	Ap2	9 - 45	Formação Florestal
			Bt1	45 - 88	
P5	LATOSSOLO VERMELHO- AMARELO Distrófico úmbrico, A proeminente	LVA	Ap2	13 - 32	Pastagem
			BA	22 - 104	
P6	CAMBISSOLO HÚMICO Eutrófico, A húmico	CH	Ap1	0 - 26	Formação Florestal
			2B1	64 - 150	
P7	CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico, A proeminente	CY	Ap1	0 - 30	Pastagem
			Bi	30 - 100	
P8	CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado	CX	Ap2	9 - 17	Pastagem
			BA	17 - 33	
P9	ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico chernossólico, A chernozêmico	PV	Ap1	0 - 25	Pastagem
			Bt	43 - 73	
P10	LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico, A húmico	LV	2Ap1	14 - 8	Pastagem
			2Bw	153 - 161	
P11		LV	Ap2	10 - 26	

LATOSSOLO VERMELHO-  
AMARELO Distrófico húmico, A  
húmico

64 - 106

Pastagem

Bw1

---

**Fonte:** Oliveira (2016).

As coletas foram realizadas nos horizontes pedogenéticos (A e B) de cada perfil e, quando os horizontes de interesse apresentavam subdivisões, selecionou a secção mais expressiva e com maior abundância de características morfológicas do horizonte. Após a coleta, as amostras foram isoladas com tampões emborrachados em cada extremidade do cilindro para prevenir possíveis choques mecânicos que comprometem a estrutura do solo.

Tanto o preparo das amostras quanto as análises foram realizadas no Laboratório de Solos e Meio Ambiente do Instituto de Geociências, na Universidade Federal de Minas Gerais. Em laboratório, as amostras foram preparadas, sendo removidos os excessos de solos nos cilindros que extrapolassem as suas dimensões. Em seguida, as amostras foram submetidas à pesagem em balança semianalítica, devidamente calibrada e com precisão de três casas decimais, para a aferição do peso seco das amostras. Após a primeira pesagem, as amostras foram submetidas à saturação por capilaridade e pesadas novamente para a identificação do peso saturado.

O processo de quantificação do fluxo saturado foi realizado utilizando o permeâmetro de carga constante, seguindo os passos descritos por Teixeira *et al.* (2017). Os valores encontrados foram inseridos na equação de Darcy (Equação 1), que possibilitou a obtenção dos valores de condutividade hidráulica saturada média para cada horizonte avaliado.

$$K = \frac{(Q \times L)}{(A \times H \times t)}$$

**Equação 1** – Equação de Darcy para o fluxo saturado

Em que:

K<sub>sat</sub> – Condutividade hidráulica, em cm.h<sup>-1</sup>;

Q – Volume do fluido percolado, em mL, ou seja, o valor da última leitura quando não há variação entre os valores anteriores, ou a média das duas leituras quando há alguma variação;

L – Altura do bloco do solo, em cm;

H – Altura do bloco do solo e da coluna de água, em cm;

A – Área do cilindro, em cm<sup>2</sup>;

t – Tempo de percolação, em horas.

### **3.3 Resultados e Discussão**

Os valores de Ksat médio encontrados são apresentados na Tabela 3, bem como um conjunto de características físicas e morfológicas de cada um dos pontos coletados e analisados. A partir da observação e análise dos dados, constata-se que os maiores valores de condutividade hidráulica saturada foram encontrados para os horizontes A, com exceção de um único perfil. Dentre as leituras observadas, o maior valor observado foi para o ponto P11A, seguido pelo ponto P6A, com valores de Ksat iguais a 36,99 e 32,63  $\text{cm.h}^{-1}$ , respectivamente (Figura 10).

Tabela 5 – Valores de Ksat por horizonte pedológico

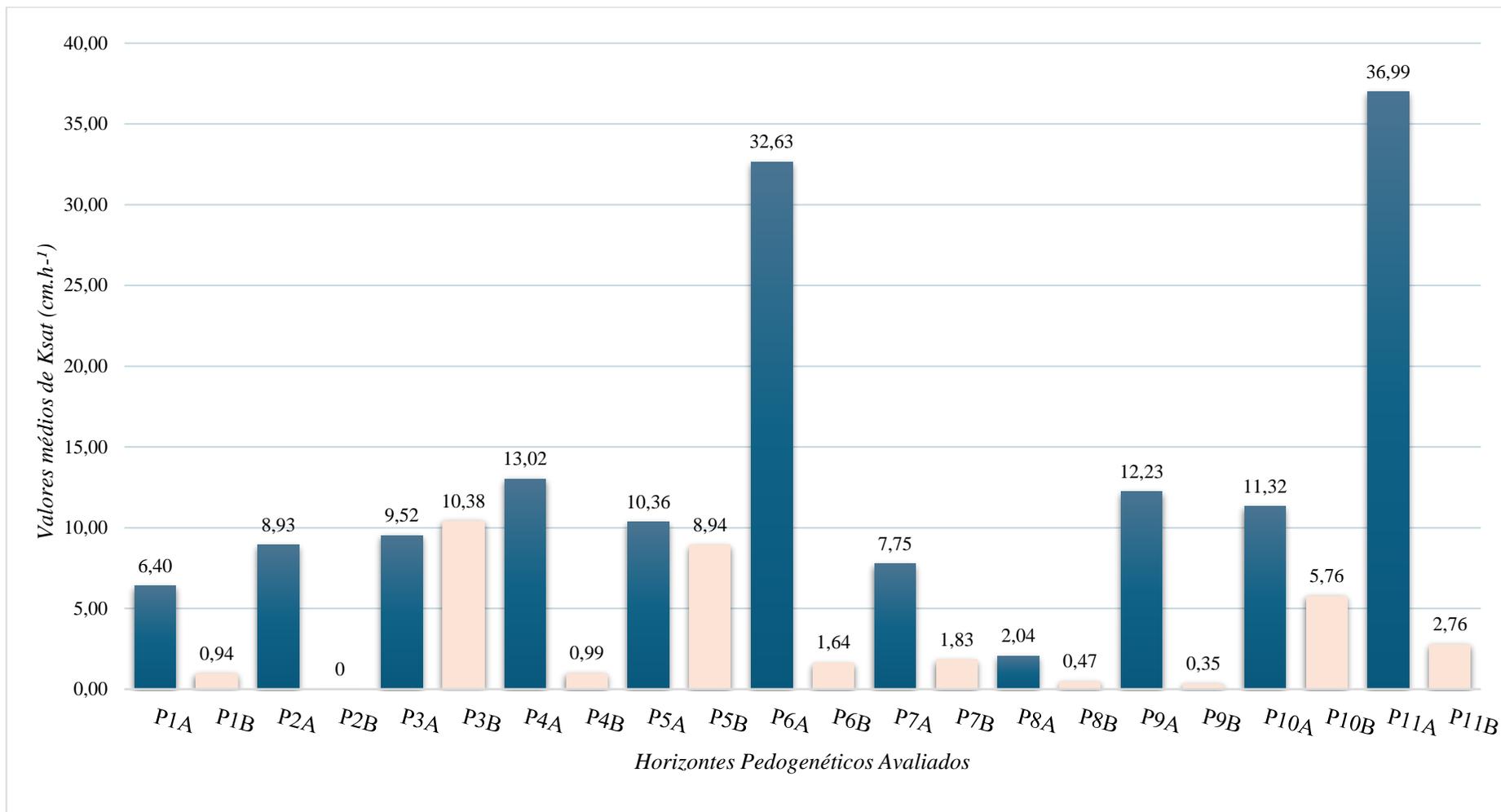
Classe*	Pontos	Horizontes	Profundidade cm	CO	Granulometria			Textura	Porosidade			Estrutura	Ksat
				Total dag/kg	Areia	Silte	Argila		Total	Macro %	Micro		Média cm.h <sup>-1</sup>
PVA	P1	Ap2	11 – 22	4,4	18	35	47	Argila	39,95	15,28	24,67	Blocos Subangulares	6,4
	P1	Bt1	22 – 48	1,5	16	31	54	Argila	33,80	12,55	21,25	Blocos Subangulares	0,94
TX	P2	Ap	0 – 26	3,6	29	27	44	Argila	39,89	15,19	24,70	Blocos Subangulares	8,93
	P2	2Bt1 <sup>4</sup>	37 – 88	1,1	26	34	40	Franco-argilosa	-	-	-	Blocos Subangulares	-
LV	P3	A	0 – 38	2,3	19	19	62	Muito argilosa	47,09	13,92	35,17	Blocos Subangulares	9,52
	P3	BA	38 – 92	0,8	17	16	68	Muito argilosa	45,17	14,04	31,14	Blocos Subangulares	10,38

<sup>4</sup>As amostras foram comprometidas em laboratório, impedindo a realização das análises.

NX	P4	Ap2	9 – 45	2,3	21	34	45	Argila	34,58	15,88	18,70	Blocos Subangulares	13,02
	P4	Bt1	45 – 88	1,5	13	33	54	Argila	24,87	8,55	16,33	Prismática	0,99
LVA	P5	Ap2	13 – 32	2,4	9	11	80	Muito argilosa	35,68	18,11	17,57	Granular	10,36
	P5	BA	32 – 104	1,9	9	12	80	Muito argilosa	36,71	11,92	24,78	Granular	8,94
CH	P6	Ap1	0 – 26	3,5	21	14	65	Muito argilosa	39,62	14,16	25,46	Blocos Subangulares	32,63
	P6	2B1	64 – 150	0,8	19	10	71	Muito argilosa	40,48	9,23	31,26	Blocos Subangulares	1,64
CY	P7	Ap1	0 – 30	2	30	36	34	Franco-argilosa	31,76	12,01	19,75	Blocos Subangulares	7,75
	P7	Bi	30 – 100	0,6	19	44	37	Franco- argilosiltosa	27,61	7,24	20,37	Blocos Subangulares	1,83
CX	P8	Ap2	9 – 17	1,1	56	18	26	Franco- argiloarenosa	41,15	8,58	32,57	Blocos Subangulares	2,04
	P8	BA	17 – 33c	0,8	56	18	26	Franco- argiloarenosa	40,76	8,33	32,43	Prismática	0,47

PV	P9	Ap1	0 – 25	2	48	25	27	Franco-argiloarenosa	41,44	11,56	29,87	Prismática	12,23
	P9	Bt	43 – 73	0,7	31	24	45	Argila	37,72	5,91	31,81	Prismática	0,35
LV	P10	2Ap1	14 – 81	1,8	8	7	85	Muito argilosa	58,69	9,29	49,40	Blocos Subangulares	11,32
	P10	Bw	153 – 161	1,2	8	6	86	Muito argilosa	30,84	8,65	22,19	Blocos Subangulares	5,76
LVA	P11	2Ap2	10– 26	2,6	8	12	80	Muito argilosa	46,30	21,94	24,36	Blocos Subangulares	36,99
	P11	Bw1	64 – 106	1,3	6	11	83	Muito argilosa	24,20	9,26	14,94	Granular	2,76

**Fonte:** Oliveira, 2016; Autor 2024. \*PVA= ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico, A moderado; TX= LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico, A húmico; LV= LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico, A proeminente; NX= NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico, A húmico; LVA= LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico, A proeminente; CH=CAMBISSOLO HÚMICO Eutrófico, A húmico; CY= CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico, A proeminente; CX= CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico, A moderado; PV= ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico chernossólico, A chernozêmico; LV= LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico, A húmico; LVA= LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico, A húmico.

**Gráfico 1** - Distribuição dos valores médios de Ksat para cada um dos horizontes avaliados

Fonte: Autor, 2024.

Em observação individual, os valores de Ksat sofreram alterações, demonstrando uma heterogeneidade entre os horizontes do solo, situação que converge com as discrepâncias observadas por outros estudos da temática, atribuindo estas ocorrências à heterogeneidade do espaço poroso (Vereecken *et al.*, 2015). Contudo, é perceptível um comportamento similar em observação a todos os perfis, com a redução da Ksat com o aumento da profundidade, assim como observado em outros estudos (Fiori, 2010; Silva *et al.*, 2012).

Com base nos dados, observa-se que os ambientes de Latossolos não demonstraram um comportamento regular nas leituras de Ksat, mesmo a classe, no geral, apresentando alta porosidade e permeabilidade por sua maior estabilidade estrutural, o que é crucial para a otimização na movimentação hídrica (Ferreira *et al.*, 1999; Silva *et al.*, 2003).

Ao longo das classes, o perfil com maior valor encontrado foi o P11 (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico), com valor médio de 36,99 cm.h<sup>-1</sup> no horizonte A. Entretanto, as leituras no horizonte B apresentaram uma redução significativa dos valores absolutos de Ksat, alcançando média de 2,76 cm.h<sup>-1</sup>. Essa situação se repete para o P10 (LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico), onde há valores de Ksat para o horizonte A de 11,32 cm.h<sup>-1</sup> e 5,76 cm.h<sup>-1</sup> para o horizonte B, porém não se mantém para os horizontes do P5 (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico úmbrico) onde os valores são próximos para ambos os horizontes, com 10,36 cm.h<sup>-1</sup> e 8,94 cm.h<sup>-1</sup> para os horizontes A e B, respectivamente. Além disso, P3 (LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico típico) sob cobertura florestal apresentou valores de Ksat de 9,52 cm.h<sup>-1</sup> para o horizonte A e 10,38 cm.h<sup>-1</sup> para o horizonte B.

Considerando-se os atributos morfológicos destes quatro Latossolos, percebe-se que há uma semelhança entre eles, principalmente no que diz respeito à sua textura, todos são muito argilosos. Essa organização textual está relacionada ao material de origem destes solos, que são metapelitos do grupo Bambuí (Sampaio *et al.*, 2016). Contudo, mesmo com o mesmo material de origem, as estruturas encontradas ao longo dos horizontes do solo sofrem modificações, reiterando o que já havia sido afirmado por Mesquita e Moraes (2004), onde a estrutura do solo é mais significativa para a condutividade hidráulica saturada do que os atributos texturais.

Com base nessa afirmação, a heterogeneidade de valores encontrados ao longo da classe mostra coerência, pois, com a mudança da estrutura, o arranjo poroso do solo também passa por modificação, influenciando a circulação da água. Nessa leitura, a estrutura de blocos subangulares presente ao longo do P3 e P10 indica valores coerentes com as afirmações das

autoras. Além disso, os valores de macro e micro porosidade também apresentam similaridade, contribuindo para a semelhança da condutividade saturada.

Como a estrutura é significativa para as dinâmicas hídricas e pode ser alterada conforme as atividades de manejo, isto torna possível estabelecer ligação entre as ações exercidas na superfície e as leituras da  $K_{sat}$ , porque práticas de manejo podem favorecer ou não a consolidação dos macroagregados (Silva *et al.*, 2019).

A partir deste pressuposto, o P3, sobre Formação Florestal, apresenta melhor prognóstico quanto à qualidade física do solo por não haver ação direta de atividades humanas ao longo de sua área, favorecendo a prestação de SEH como à recarga hídrica pelo auxílio do sistema radicular profundo das vegetações de grande porte, contribuindo para uma melhor distribuição dos valores de  $K_{sat}$  ao longo do solo (Silva *et al.*, 2017; Tenenwurcel *et al.*, 2020). Além disso, diversos outros SE são prestados pelos ambientes florestais, porém, para a quantificação exata destes, torna-se necessário a aplicação de estudos mais detalhados sobre esse ambiente (Moura *et al.*, 2023).

Ao se comparar as leituras obtidas entre a Formação Florestal e a Pastagem no P10, evidencia-se que os ambientes sob floresta apresentam maiores benefícios ambientais, especialmente pelos valores mais elevados de  $K_{sat}$  observados em subsuperfície. Embora o horizonte A do P10 apresente valores superiores de  $K_{sat}$ , o horizonte B revela-se como um fator limitante por haver uma redução de aproximadamente 30% na porosidade total, comprometendo a circulação da água em profundidade e, podendo levar a um aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente, intensificando os processos erosivos e as perdas ambientais.

As leituras obtidas ao longo do P5 e P11, que apresentam estrutura granular, apresentam um comportamento diferente dos perfis apresentados anteriormente. A consolidação dessa estrutura está associada de maneira íntima à presença de matéria orgânica no perfil de solo, proporcionando a construção de formas arredondadas ao longo dos agregados pela atividade biológica (Lepsch, 2011), fato que proporciona maior desenvolvimento da pedalidade e uma maior estabilidade estrutural, favorecendo a circulação hídrica (Castro; Cooper, 2019).

Os dados de porosidade do P5 apresentam menor variabilidade na quantidade de poros, indicando melhor qualidade física do solo por preservar as estruturas (Silva *et al.*, 2019; Bonneti *et al.*, 2019; Santana, 2023). Essa situação é favorável à consolidação da conectividade e continuidade dos poros ao longo do perfil de solo, promovendo uma maior uniformidade dos valores de  $K_{sat}$  ao longo dos horizontes.

Os valores de Ksat encontrados no P11 são discrepantes em relação aos demais, principalmente no horizonte A do solo. Neste caso, ao que tudo indica, a gênese do horizonte húmico no P11 pode ser o principal fator para os maiores valores de Ksat, principalmente pela melhor estabilização física que os maiores teores de matéria orgânica proporcionam, favorecendo a melhor agregação (Beare *et al.*, 1994; Brady, 2013). Em termos de gênese, o horizonte A húmico apresenta características morfológicas singulares, apresentando principalmente um horizonte A espesso, escuro e rico em carbono orgânico em profundidade (Silva; Vidal Torrado, 1999).

Diferentes pesquisadores efetuaram apontamentos sobre o papel dos horizontes húmicos na estabilização das propriedades físicas do solo e indicaram que a preservação da matéria orgânica nestes, sobretudo em ambientes de altas temperaturas e precipitação, provavelmente esteja associada a uma reorganização estrutural do solo, que provocou uma maior proteção da matéria orgânica pelos minerais de argila, a elevada acidez e alta saturação por alumínio (Silva; Vidal Torrado, 1999; Calegari, 2009; Marques, 2009).

Esses valores mais significativos de Ksat também são observados ao longo de outros pontos com classes pedológicas distintas, mas com o mesmo horizonte A húmico sendo, P2 (LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico), P4 (NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico), P6 (CAMBISSOLO HÚMICO Eutrófico), P10 (LATOSSOLO VERMELHO Distrófico húmico) e P11 (LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico húmico) em que todos os horizontes A apresentaram valores absolutos superiores aos horizontes B. Com base nessa organização, é possível afirmar que, nos pontos analisados, as classes de uso e cobertura do solo não são determinantes frente às propriedades hidráulicas dos solos, visto que valores de Ksat mostram-se elevados mesmo em usos variados, mas sobre o mesmo tipo de horizonte A.

Todavia, estudos destacam que a melhor qualidade física dos solos está diretamente relacionada com o emprego de manejos conservacionistas, visando a preservação das estruturas do solo (Silva *et al.*, 2019; Bonnet *et al.*, 2019; Santana, 2023), fato que pode ser o diferencial na área para potencializar os processos de Ksat ao longo dos horizontes de solo, potencializando dessa maneira os SEH.

Observando os dados oriundos da classe dos Argissolos, observa-se significativa descontinuidade hidráulica entre os horizontes A e B para ambos os perfis avaliados, tanto para P1 (ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico nitossólico) quanto para P9 (ARGISSOLO VERMELHO Eutrófico chernossólico). Essa ruptura tem relação com o processo genético dos horizontes de subsuperfície da classe, onde há a migração da argila de

um horizonte para o outro, proporcionando seu acúmulo no ambiente de subsuperfície responsável por dar origem ao horizonte B textural (Bt). Essa ruptura hidráulica também pode ser observada em outros perfis que possuem dentro de seus processos específicos a translocação da argila interna, como o P4 (NITOSSOLO HÁPLICO Eutrófico típico) e o P2 (LUVISSOLO HÁPLICO Pálico típico).

Essa migração ocorre por meio da solução do solo (água + sais diluídos), havendo variabilidade conforme o grau de solubilidade das substâncias transportadas. No geral, através do sistema poroso, esse processo acontece de modo sereno, transportando argilas e sesquióxidos de ferro e alumínio complexados, consolidando horizontes subsuperficiais com maior concentração da fração argila (Oliveira, 1972). Por consequência, há a formação de cerosidades nas superfícies dos agregados utilizados no processo de categorização dos solos, bem como proporcionando a obstrução do sistema poroso pela estabilização dos compostos transportados dos horizontes superficiais (Oliveira, 1972; Lepsch, 2011), fato que proporciona a redução dos valores de  $K_{sat}$ , como observados em outros estudos (Trindade *et al.*, 2010; Padrón *et al.*, 2015).

Esses fatos ficam explícitos avaliando a distinção entre os teores de argila ao longo do P9, com 27 dag/kg de argila no horizonte A para 45 dag/kg no horizonte B, fato que pode proporcionar o preenchimento dos espaços vazios ao longo da estrutura prismática (Castro; Cooper, 2019), como no caso havendo a redução dos macroporos em cerca de 50% na mudança dos horizontes, comprometendo dessa maneira a circulação hídrica. Além do aumento da relação textural na mudança de horizontes, o P1 apresenta redução nos teores de carbono orgânico, proporcionando dessa maneira uma maior dificuldade nos processos de desenvolvimento de sua estrutura, fato que pode contribuir ainda mais para a instabilidade das argilas em subsuperfície, provocando obstruções.

Em uma interpretação similar, o P4, que apresenta o mesmo processo de formação, teve valores de  $K_{sat}$  extremamente distintos entre os horizontes. Contudo, essa distinção é atrelada à melhor estabilização física dos agregados atribuída aos maiores teores de matéria orgânica presentes no horizonte A húmico (Beare *et al.*, 1994; Brady, 2013). Para o horizonte A obtiveram-se valores de 13,02  $\text{cm.h}^{-1}$  enquanto para o horizonte B o valor foi de 0,99  $\text{cm.h}^{-1}$ . Para além dos processos de incremento de argila pela migração, a redução dos valores de  $K_{sat}$  para o horizonte B também é reflexo da redução do carbono orgânico e da macroporosidade, bem como a presença de estruturas prismáticas no horizonte B. Para o P2, foi possível avaliar apenas o horizonte A, pois as amostras do horizonte B foram comprometidas em laboratório e,

buscando ser fiel aos resultados, optou-se por não as utilizar. Nesse ponto, encontraram-se valores de Ksat correspondentes a 8,93 cm.h<sup>-1</sup>.

Para os P6 (CAMBISSOLO HÚMICO Eutrófico), P7 (CAMBISSOLO FLÚVICO Tb Eutrófico típico) e P8 (CAMBISSOLO HÁPLICO Tb Distrófico típico), observou-se uma ampla variabilidade entre suas propriedades físico-hídricas, situação que está atrelada principalmente ao segundo nível categórico da classe. Como os demais pontos analisados, os valores superiores de Ksat foram encontrados juntos do horizonte A, enquanto o horizonte B foi marcado por uma expressiva redução dos valores.

O P6 foi o perfil que apresentou o segundo maior valor de Ksat de toda a bacia, 32,63 cm. ha<sup>-1</sup>, refletindo o papel fundamental do elevado teor de matéria orgânica em seu horizonte A, classificando-o como húmico. Além disso, este ponto encontra-se sob formação florestal, demonstrando mais uma vez que o uso conservacionista auxilia na melhora dos valores de Ksat, sendo possível obter SEH em maior volume nestes ambientes. Todavia, seguida por limitações frente ao desenvolvimento da estrutura, os valores de Ksat em seu horizonte B indicaram uma drástica redução na mobilidade hídrica no interior do perfil.

O P7 apresenta uma grande diferenciação nos teores de areia, carbono e de macroporosidade entre seus horizontes, situação que resultou novamente na redução significativa dos valores de Ksat do horizonte A para o B, sendo de 7,75 cm. ha<sup>-1</sup> e 1,83 cm. ha<sup>-1</sup> respectivamente. De maneira semelhante, o P8, por sua vez, apresentou alterações de estrutura de um horizonte para o outro, alternando de blocos subangulares no horizonte A para prismáticas no horizonte B, mas em ambos os casos os valores de Ksat já se mostram reduzidos com 2,04 cm. ha<sup>-1</sup> no horizonte A e 0,47 cm. ha<sup>-1</sup> no horizonte B, possivelmente por consequência do menor grau de desenvolvimento de suas estruturas.

Os resultados obtidos indicam que, ao longo da bacia hidrográfica do Córrego Marinheiro, há uma ampla variação nos valores de Ksat, evidenciando ambientes com alta propensão à movimentação hídrica no horizonte superficial, mas que apresentam limitações em profundidade. Essa dinâmica ressalta as limitações de avaliar o Ksat com base em profundidades pré-estabelecidas, sem considerar os processos ambientais e as características específicas dos solos. Essa abordagem pode comprometer a interpretação ambiental e a compreensão da funcionalidade ecossistêmica do território.

No caso da bacia do Córrego Marinheiro, a aplicação de métodos que utilizam profundidades pré-estabelecidas e desconsideram os horizontes subsuperficiais implicaria na perda de informações cruciais para a compreensão da movimentação hídrica ao longo do solo.

Isso porque a variação nos valores de Ksat observados na bacia reflete as interações entre os fatores pedogenéticos de cada horizonte e o uso e manejo do solo de superfície. Ignorar essas nuances comprometeria diretamente a análise de serviços ecossistêmicos hídricos prestados pelo solo na bacia.

A heterogeneidade do espaço poroso (Vereecken *et al.*, 2015) reflete o desafio de interpretar os valores de Ksat de forma generalizada. Por exemplo, ao considerar apenas os valores obtidos por horizontes superficiais, ambientes como o P6 e o P11, que apresentam altos valores de Ksat na superfície, poderiam ser considerados mais adequados para a prestação de SEH do que o P3 e o P5. No entanto, a recarga hídrica eficiente requer tanto uma infiltração inicial quanto uma percolação vertical efetiva em profundidade (Nimmo *et al.*, 2009; Saraf *et al.*, 2004), condição não atendida pelos dois primeiros ambientes.

Todavia, é crucial salientar que os atributos envolvidos na dinâmica hídrica interna do solo estão fortemente associados às práticas de manejo e conservação realizadas na superfície, pois solos com boa qualidade física favorecem a infiltração e percolação da água por seus espaços porosos, situação que impacta diretamente o armazenamento hídrico (Shi *et al.*, 2012; Chaveiro *et al.*, 2022). Por outro lado, práticas inadequadas de manejo podem reduzir os valores de Ksat, resultando em diferenças significativas até mesmo em solos com atributos semelhantes, mas submetidos a diferentes práticas de manejo dentro da mesma bacia hidrográfica (Cherubin *et al.*, 2016; Bonneti *et al.*, 2019; Batista *et al.*, 2020; Rocha *et al.*, 2019).

Portanto, ao avaliar os valores de Ksat em profundidades específicas, sem considerar os fatores pedogenéticos e as interações com o uso do solo, corre-se o risco de subestimar ou distorcer a dinâmica hídrica real da bacia. Esse cuidado é essencial para uma análise robusta, que reflita a funcionalidade ecológica e as potencialidades de serviços ecossistêmicos hídricos de cada ambiente.

### **3.4 Considerações finais**

Os resultados obtidos ao longo da análise destacam que a dinâmica hídrica nos perfis de solo da bacia do Córrego Marinheiro é diretamente influenciada por processos pedogenéticos que definem as características estruturais e os atributos morfológicos dos solos avaliados. A estrutura do solo, combinada à distribuição e organização dos poros, desempenha papel central na infiltração e percolação da água, de modo que estes processos estão intimamente ligados à gênese dos solos. Solos que com estrutura bem desenvolvida e alta estabilidade de agregados favoreceram a Ksat, enquanto solos com menor desenvolvimento pedológico apresentam

limitações significativas, o que pode resultar em maior escoamento superficial e intensificação dos processos erosivos.

Além da estrutura natural, as práticas de manejo e conservação do solo têm influência direta nos valores de  $K_{sat}$ . Ações inadequadas de manejo podem comprometer a qualidade física do solo, reduzindo sua permeabilidade e aumentando a vulnerabilidade a processos de degradação. Por outro lado, práticas conservacionistas que busquem preservar a estrutura do solo, como a manutenção de cobertura vegetal, se mostraram mais significativas para a prestação de serviços ecossistêmicos hídricos.

Para avançar na compreensão e avaliação da dinâmica hídrica ao longo dos perfis de solo, torna-se imprescindível o desenvolvimento e aprimoramento de metodologias que considerem os atributos morfológicos específicos de cada classe de solo. Estudos futuros devem priorizar a integração entre análises de condutividade hidráulica em diferentes profundidades e horizontes, bem como a caracterização estrutural detalhada dos solos e a modelagem hidrológica para diferentes cenários de uso da terra. Para isso, é necessário que ocorra cada vez mais estudos integrados que abordem não apenas os aspectos físicos e hidrológicos, mas também os impactos das práticas de manejo na dinâmica hídrica e na provisão de serviços ecossistêmicos.

### **3.5 Conclusão**

- Os valores de  $K_{Sat}$  foram influenciados pelos horizontes do solo e estes, por sua vez, refletem os processos pedogenéticos presentes na sua formação.
- Os maiores valores de  $K_{Sat}$  foram obtidos para os horizontes A húmico, com diferença expressiva em relação aos demais horizontes.
- Para a mesma classe de solo, a  $K_{sat}$  dos perfis foi influenciada pelas características morfológicas destes, sendo a estrutura a propriedade mais determinante da maior condutividade hidráulica.
- Diferentes classes de solos apresentam comportamentos distintos quanto às funções desempenhadas pelos solos, assim, conhecer as características dos solos é fundamental para qualificar o potencial dos diferentes serviços ecossistêmicos prestados pelos solos.

## Referências

- AMARAL, J. R. **Caracterização físico-hídrica dos solos da bacia do Córrego Marinheiro, Sete Lagoas – MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de pós-graduação em Geografia. IGC-UFMG. 2018, 153p.
- BATISTA, L. S.; GOMES FILHO, R.R.; CARVALHO, C. M.; PEDROTTI, A.; SANTOS, I.L.N.; FACCIOLI, G.G.; ASSUNÇÃO, S.J.R.; COSTA, D.R.; Water infiltration rate in the soil under different uses and covers in the Poxim River basin, Sergipe, Brazil. **International Journal for Innovation**, v. 8, n.º 11, p.321–339. 2020.
- BEARE, M. H.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. Water-stable aggregates and organic matter fractions in conventional and no-tillage soils. **Soil Science Society of American Journal, Madison**, vol. 58, p. 777-786. 1994.
- BONETTI, J. A.; ANGHINONI, I.; GUBIANI, P. I.; CECAGNO, D.; MORAES, M. T.; Impact of a long-term crop-livestock system on the physical and hydraulic properties of an Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 186, p. 280-291. 2019.
- BRADY, N. C. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3a ed. Porto Alegre: Bookman. 2013.
- CALEGARI, M. R. **Ocorrência e significado paleoambiental do Horizonte A húmico em Latossolos**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2009.
- CALICIOGLU, O.; FLAMMINI, A.; BRACCO, S.; BELLÙ, L.; SIMS, R. The future challenges of food and agriculture: An integrated analysis of trends and solutions. **Sustainability**, v. 11, 2019.
- CASTRO, S. S.; COOPER, M. **Fundamentos de micromorfologia de solos**. SBCS, 2019.
- CHAVEIRO, A. C.; BONINI, C. S. B.; FREITAS, P. G. N.; REIS, D. C. S.; OLIVEIRA, J. M. K.; SOUZA, J. A. L.; HIDALGO, G. F.; OLIVEIRA, A. B. Soil physical and chemical quality on no tillage cultivated with vegetables – A review. **Research, Society and Development**. v. 11, n.º 9, e32711931564, 2022.
- CHERUBIN, M.R.; KARLEN, D.L.; FRANCO, A.L.C.; CERRI, C.E.P.; TORMENA, C.A.; CERRI, C.C. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society of America Journal**, v. 80, p. 215–226, 2016.
- CONSTANZA, R.; DALY, L.; FIORAMONTI, L.; GIOVANNINI, E.; KUBISZEWSKI, I.; MORTENSEN, L.F.; PICKETT, K.E.; RAGNARSDOTTIR, K.V.; DE VOGLI, R.; WIKINSON, R. Modelling and measuring sustainable wellbeing in connection with the UN sustainable development goals. **Ecological Economics**, v.130, p. 350–355, 2014.
- COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; SUTTON, P.; VAN DER PLOEG, S.; ANDERSON, S.J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R.K. Changes in the global value of ecosystem services. **Global Environmental Change**, v. 26, p. 152–158, 2016.

- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, p. 507–514, 1999.
- FIORI, J. P. O.; CAMPOS, J. E. G.; ALMEIDA, L. Variabilidade da condutividade hidráulica das principais classes de solos do estado de Goiás. **Geociências**, v. 29, n.º 2, p.229-235, 2010.
- HAINES-YOUNG, R., POTSCHIN, M. CICES V5. 1. Guidance on the Application of the Revised Structure. **Fabis Consulting**, 53, 2018.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil & Tillage Research**, v. 82, p. 121–145, 2005.
- HU, W.; SHAO, M.; WANG, Q.; FAN, J.; HORTON, R. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. **Geoderma**, v. 149, p. 355–366, 2009.
- KOSMAS, C.; GERONTIDIS, S.; MARATHIANOU, M. The effect of land use change on soils and vegetation over various lithological formations on Lesbos (Greece). **Catena**, v. 40, p. 51–68. 2000.
- LEPSH, I. F. **19 Lições de Pedologia**. Oficina de Textos, São Paulo, 2011.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. 2.ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 509p.
- LIBARDI, P. L.; GONÇALVES, A. D. M. A. Análise da determinação da condutividade hidráulica do solo pelo método do perfil instantâneo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, vol. 37, n. 5, p. 1174-1184. 2013.
- MACDONALD, D.; CRABTREE, J.R.; WIESINGER, G.; DAX, T.; STAMOU, N.; FLEURY P. Agricultural abandonment in mountain areas of Europe: Environmental consequences and policy response. **Journal Environmental Management**, v. 59, p. 47–69. 2000.
- MARQUES, F. A. **Matéria Orgânica de Latossolo com horizonte A húmico**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT - MEA. Ecosystems and human well-being: synthesis. **Island Press**, Washington, DC, ISBN 1-59726-040-1, p. 155. 2005.
- MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n.3, p. 963-969, 2004.
- MOURA, M. S. M. **Avaliação da dinâmica de provisão de serviços ecossistêmicos múltiplos no alto curso do Rio das Velhas, MG**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023.
- MOURA, M. S.; SILVA, V. C.; PACHECO, F. A. L.; FERNANDES, L. F. S.; PISSARRA, T. C. T.; COSTA, A. M. Beyond land use planning and ecosystem services assessment with the conservation use potential framework: A study in the Upper Rio das Velhas basin, Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 923, p. 171437. 2024b.

- NIMMO, J. R.; SCHMIDT, K. M.; PERKINS, K. S.; STOCK, J.D. Rapid measurement of field-saturated hydraulic conductivity for areal characterization. **Vadose Zone Journal**, v.8, 142–149, 2009.
- OLIVEIRA, J. B. Fatores de Formação do solo *In*: MONIZ, A. C. **Elementos de Pedologia**. Editora Polígono, São Paulo, 1972.
- OLIVEIRA, A. R. de. **Relações solo-paisagem e modelo de predição de solos da bacia do córrego Marinheiro, Sete Lagoas (MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Programa de pós-graduação em Geografia. IGC-UFMG. 2016, 74 f.
- O'RIORDAN, R.; DAVIES, J.; STEVENS, C.; QUINTON, J.N.; BOYKO, C. The ecosystem services of urban soils: a review. **Geoderma**, v. 395, 2021.
- PADRÓN, R. A. R.; NOGUEIRA, H. M. C.; CERQUERA, R. R.; ALBINO, G. D.; NOGUEIRA, C. U. Caracterização físico-hídrica do solo argissolo amarelo para estabelecimento de projeto e manejo da irrigação. **Acta Iguazu**, v. 4, n.1, p. 36-47. 2015.
- PEREIRA, P.; BOGUNOVIC, I.; MUÑOZ-ROJAS, M; BREVIK, E. C. Soil ecosystem services, sustainability, valuation and management. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, v. 5, p. 7–13, 2018.
- ROBINSON, D. A.; FRASER, I.; DOMINATI, E. J.; DAVÍÐSDÓTTIR, B.; JÓNSSON, J. O. G.; JONES, L.; JONES, S. B.; TULLER, M. LEBRON, I.; BRISTOW, K. L.; SOUZA, D. M.; BANWART, S.; CLOTIER, B. E. On the value of soil resources in the context of natural capital and ecosystem service delivery. **Soil Science Society America Journal**, v. 78, p. 685-700, 2014. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2014.01.0017>.
- ROCHA, R. E.; GASTIMANS, D.; SACCHI, M. D.; OLIVEIRA, M. D. Variações espaciais na  $K\theta$  do solo em área de recarga do sistema aquífero Guarani. **Revista do Instituto Geológico**, v. 40, n.º 2, p. 35-51. 2019.
- SACO, P.M.; MCDONOUGH, K.R.; RODRIGUEZ, J.F.; RIVERA-ZAYAS, J.; SANDI, S.G. The role of soils in the regulation of hazards and extreme events. *Philos.* **The Royal Society**, 2021.
- SAMPAIO, J. D.; SILVA, S. A. M.; VIANA, J. H. M. V.; COSTA, A. M.; OLIVEIRA, A. R. **Mapa litológico preliminar da bacia do córrego Marinheiro**. Belo Horizonte: [s.d.], 2016. Mapa litológico. Arquivos vetoriais armazenados em memória flash portátil. Não publicado.
- SANTANA, M. L. T. **Soil health and ecosystem services related to water recharge in the cantareira system**. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2023.
- SARAF, A.K.; CHOUDHURY, P.R.; ROY B.; SARMA, B.; VIJAY, S.; CHOUDHURY, S. GIS based surface hydrological modelling in identification of groundwater recharge zones. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, p. 5759–5770, 2004.
- SCANLON, B.R.; KEESE, K.E.; FLINT, A.L.; FLINT, L.E.; GAYE, C.B.; EDMUNDS, W.M.; SIMMERS, I. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. **Hydrology Processes**, v. 20, p. 3335–3370, 2006.

- SHI, X. H., YANG, X. M., DRURY, C. F., REYNOLDS, W. D., MCLAUGHLIN, N. B.; ZHANG, X. P. Impact of ridge tillage on soil organic carbon and selected physical properties of a clay loam in southwestern Ontario. **Soil and Tillage Research**, v. 120, p. 1-7. 2012.
- SILVA, A. C.; VIDAL-TORRADO. Gênese, morfologia e classificação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n.º 2, 1999.
- SILVA, A. S.; COSTA, G. C. P.; TÁVORA, G. S. G.; SELINGER, R. **Influência do pisoteio do gado na alteração das propriedades físicas de horizontes superficiais em Santo Antônio de Pádua (RJ)**. GEO UERJ. 2019.
- SILVA, E. M.; AZEVEDO, J. A.; RAUBER, J. C.; REATTO, A. Caracterização físico-hídrica e hidráulica de solos do bioma Cerrado submetidos a diferentes sistemas de preparo. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, EMBRAPA, Planaltina, DF, 2003.
- SILVA, M. C. C.; ANDREOTTI, M.; COSTA, N. R.; LIMA, C. G. R.; PARIZ, C. M. Soil physical attributes and yield of winter common bean crop under a no-till system in the Brazilian cerrado. '**Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 155-163, 2017.
- SILVA, J. R. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; dos SANTOS, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, vol. 16, n. 1, p. 27–36. 2012.
- SOBIERAJ, J. A.; ELSENBEER, H.; COELHO, R. M.; NEWTON, B. Spatial variability of soil hydraulic conductivity along a tropical rainforest catena. **Geoderma**, v. 108, n. 1–2, p. 79–90, 2002.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G (Editores Técnicos). **Manual de métodos de análise de solo**. 3ª ed. Brasília, DF. EMBRAPA. 2017
- TENENWURCEL, M. A.; MOURA, M. S.; COSTA, A. M.; MOTA, P. K.; VIANA, J. H. M.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. An improved model for the evaluation of groundwater recharge based on the concept of conservative use potential: a study in the River Pandeiros watershed, Minas Gerais, Brazil. **Water**, v. 12, n. 4, 2020.
- TRINDADE, E. F. S., CARVALHO, E. J. M.; CORRÊA, P. C. S. Comportamento físico-hídrico de um argissolo amarelo distrófico sob diferentes sistemas de manejo no Nordeste paraense. **Amazônia, Ciência & Desenvolvimento**, v. 5, n10. 2010.
- VERECKEN, H.; *et al.* Modeling soil processes:review, key challenges, and new perspectives, **Vadose Zone Journal**, 15, pp.1–57. 2015.
- ZENG, C.; ZHANG, F.; WANG, Q.; CHEN, Y.; JOSWIAK, D. R. Impact of alpine meadow degradation on soil hydraulic properties over the Qinghai-Tibetan Plateau. **Journal of Hydrology**, v. 478, p. 148–156, 2013.