



SARAH DIECKMAN ASSUNÇÃO RODRIGUES

**MAPEAMENTO DE FUNÇÕES DO SOLO EM BACIA
HIDROGRÁFICA NO BIOMA MATA ATLÂNTICA**

**LAVRAS – MG
2024**

SARAH DIECKMAN ASSUNÇÃO RODRIGUES

**MAPEAMENTO DE FUNÇÕES DO SOLO EM BACIA HIDROGRÁFICA NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi – Orientador
Prof. Dr. Bruno Montoani Silva – Coorientador

**LAVRAS – MG
2024**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Rodrigues, Sarah Dieckman Assunção.

Mapeamento de funções do solo em bacia hidrográfica no
bioma Mata Atlântica / Sarah Dieckman Assunção Rodrigues. -
2024.

60 p. : il.

Orientador(a): Junior Cesar Avanzi.

Coorientador(a): Bruno Montoani Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Funções do solo. 2. Serviços ecossistêmicos. 3. Recarga
Hídrica. I. Avanzi, Junior Cesar. II. Silva, Bruno Montoani. III.
Título.

SARAH DIECKMAN ASSUNÇÃO RODRIGUES

**MAPEAMENTO DE FUNÇÕES DO SOLO EM BACIA HIDROGRÁFICA NO
BIOMA MATA ATLÂNTICA**

**MAPPING OF SOIL FUNCTIONS IN A WATERSHED IN THE ATLANTIC FOREST
BIOME**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, área de concentração em Recursos Ambientais e Uso da Terra, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2024.

Dr. Junior Cesar Avanzi UFLA

Dr. Bruno Montoani Silva UFLA

Dr. Sergio Henrique Godinho Silva UFLA

Dr. Bruno Oliveira Lafetá IFMG

Prof. Dr. Junior Cesar Avanzi
Orientador

Prof. Dr. Bruno Montoani Silva
Coorientador

**LAVRAS- MG
2024**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me colocar nesse caminho e me sustentar durante todo o percurso. Por colocar pessoas iluminadas no meu dia a dia e me proteger sempre, sem Ele não sou nada.

À minha avó Maria do Carmo, meus irmãos Pedro, Raul e tia Selma por todo amor, carinho, criação e dedicação a mim.

À minha família materna e paterna por me incentivar a buscar conhecimento e me desenvolver como profissional e ser humana.

Aos meus orientadores Junior Cesar, Bruno Montoani pela recepção no Departamento de Ciência do Solo, por me fazer acreditar que conseguiria concluir o mestrado, pela paciência e por todos seus ensinamentos.

Aos meus grandes amigos, Luís, Michele, Larissa Nara, Priscilla, Josiel, Eduardo, Larissa Brito, Gabriele, Tamires, Ana Maria, Beatriz e Raul, pelo apoio, amizade, companheirismo, motivação, suporte acadêmico e emocional.

Agradeço ao meu psicólogo Eliú por me ajudar no contínuo caminho do autoconhecimento e amparo emocional.

A todos os professores e funcionários do DCS/UFLA por todo conhecimento transmitido.

Aos técnicos Téo e Malu do Laboratório de Física do Solo, por todo ensinamento e suporte técnico.

Aos meus amigos Rafaela, Luiz Otávio e Ana Carolina por tanto carinho e incentivo.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro e concessão de bolsas de estudo.

“A procura da verdade é difícil e é fácil, já que ninguém poderá desvendá-la por completo ou ignorá-la inteiramente. Contudo, cada um de nós poderá acrescentar um pouco do nosso conhecimento sobre a natureza e, disto, uma certa grandeza emergirá.”

Aristóteles

RESUMO

A perda de vegetação nativa e alterações não sustentáveis no uso do solo promovem a redução dos serviços ecossistêmicos. Deste modo, é necessário garantir uma cobertura adequada do solo e um manejo apropriado para melhorar a infiltração de água e prevenir problemas de erosão. O mapeamento digital de solos permite uma compreensão abrangente das condições do solo ao estabelecer relações matemáticas entre variáveis ambientais e as variáveis de interesse. O uso do mapeamento digital para espacializar os índices de qualidade física do solo em uma bacia hidrográfica, oferece a possibilidade de visualizar e compreender a distribuição desses índices ao longo da área. Dessa forma, proporcionando melhor planejamento no manejo a ser praticado. Avaliou-se o Índice de Qualidade Física do Solo (IQFS) em uma bacia hidrográfica localizada no campus da Universidade Federal de Lavras (MG, Brasil), com o objetivo de mapear as funções do solo para identificar áreas propícias à recarga hídrica. Foram selecionados 17 pontos georreferenciados em uma grade regular, cobrindo uma área de 9 hectares, e realizadas amostragens em áreas de mata de regeneração e agricultura. Cada ponto de amostragem foi espaçado por 70 metros e avaliado quanto a indicadores como densidade do solo, textura, condutividade hidráulica, matéria orgânica, porosidade, resistência à penetração e infiltração de água. Os índices foram calculados e mapas foram gerados utilizando o método de Ponderação pela Distância Inversa, que indicaram as áreas mais adequadas para recarga hídrica na bacia em uma escala ultradetalhada (1:2.000). Observou-se que os maiores valores de IQFS na profundidade de 0-10 cm no solo ocorreram em uma região coberta por mata de regeneração. Esta área exerceu uma influência positiva em diversas funções do solo, tais como trocas gasosas, fornecimento de água para as plantas, resistência à erosão, potencial de recarga, taxa básica de infiltração, espessura do horizonte A e estoque de carbono, resultando em melhor Índice de Qualidade Física do Solo.

Palavras-chave: Indicadores físicos do solo; recarga hídrica; manejo sustentável.

ABSTRACT

The loss of native vegetation and unsustainable changes in land use promote the reduction of ecosystem services. Therefore, it is necessary to ensure adequate soil coverage and appropriate management to improve water infiltration and prevent erosion problems. Digital soil mapping allows for a comprehensive understanding of soil conditions by establishing mathematical relationships between environmental variables and the variables of interest. The use of digital mapping to spatialize soil physical quality indices in a river basin offers the possibility of visualizing and understanding the distribution of these indices throughout the area. In this way, providing better planning in the management to be practiced. The Soil Physical Quality Index (IQFS) was evaluated in a river basin located on the campus of the Federal University of Lavras (MG, Brazil), with the objective of mapping soil functions and IQFS related to soil ecosystem services to identify areas conducive to water recharge. 17 georeferenced points were selected in a regular grid, covering an area of 9 hectares, and sampling was carried out in areas of forest regeneration and agriculture. Each sampling point was spaced 70 meters apart and evaluated for indicators such as soil density, texture, hydraulic conductivity, organic matter, porosity, resistance to penetration and water infiltration. The indices were calculated and maps were generated using the Inverse Distance Weighting method, which indicated the most suitable areas for water recharge in the basin on an ultra-detailed scale (1:2,000). It was observed that the highest IQPS values at a depth of 0-10 cm in the soil occurred in a region covered by regeneration forest. This area exerted a positive influence on several soil functions, such as gas exchange, water supply for plants, erosion resistance, recharge potential, basic infiltration rate, thickness of the A horizon and carbon stock, resulting in a better Index of Soil Physical Quality.

Keywords: Soil physical indicators; water recharge; sustainable management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	9
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1	Mata Atlântica.....	10
2.2	Uso da terra.....	11
2.3	Bacias hidrográficas.....	12
2.4	Índices de qualidade física do solo.....	13
2.5	Indicadores físicos do solo.....	14
2.6	Serviços ecossistêmicos do solo.....	15
2.7	Mapeamento digital de solos.....	16
	REFERÊNCIAS.....	17
	Segunda parte – Artigo.....	25
	Mapeamento de índices de qualidade física do solo em bacia hidrográfica no bioma Mata Atlântica.....	25

1 INTRODUÇÃO GERAL

A qualidade do solo, juntamente com a qualidade da água e do ar, constitui um dos três componentes da qualidade ambiental (ANDREWS et al., 2002). A análise da qualidade do solo é fundamental para determinar o diagnóstico atual do ambiente, por meio da avaliação de diversas propriedades do solo (DOS SANTOS et al., 2021).

A perda da qualidade física do solo (QFS) ameaça os serviços ecossistêmicos (SEs) do solo. A QFS pode ser definida pela interligação de diversas variáveis. Sua influência direta se estende às propriedades químicas e biológicas do solo, desempenhando, um papel central na qualidade do sistema (SILVA, 2020). Dessa forma, deve-se salientar a relevância da cobertura do solo e de um adequado manejo dessas áreas, com o intuito de obter melhorias na infiltração de água no solo, evitar problemas de erosão (CAMELO; SANCHES, 2019) e escassez hídrica.

O solo desempenha o papel de um reservatório dinâmico de água, onde suas características e propriedades têm a capacidade de impactar a recarga hídrica, pois diversos atributos do solo estão intimamente ligados aos processos de infiltração (MENEZES et al., 2009). Dentre os fatores que influenciam a capacidade de infiltração de água no solo, pode-se citar a porosidade, umidade, atividade biológica, cobertura vegetal, rugosidade superficial e declividade do terreno (CAUDURO; DORFMAN, 1988).

O manejo também tem influência direta sobre a distribuição de poros, o que chama a atenção para as alterações no tipo de uso e de cobertura do solo. A forma mais eficaz de proporcionar a qualidade e quantidade de água é realizar o manejo adequado do solo nessas áreas (LIMA et al., 2013). Nas bacias onde ocorrem alterações no uso da terra, tais como desmatamento e compactação, a geração de escoamento superficial aumenta, o que resulta em menor quantidade de água retida durante as chuvas e aceleração dos processos de erosão (PEREIRA et al., 2015).

Extensas áreas têm sofrido redução da sua vegetação nativa e/ou alteração não sustentável no uso do solo. Como consequência, tem havido perda de muitos SEs do solo (SILVA-OLAYA et al., 2022). Tais alterações estão deteriorando as funções de evapotranspiração, taxa de infiltração e serviços hidrológicos (ALARSA et al., 2018).

O mapeamento digital de solos (MDS) tem sido uma ótima ferramenta para monitorar bacias hidrográficas e mapear os índices de qualidade física do solo, tendo em vista que possibilita entender as variações espaciais de atributos do solo e sua influência nos SEs (ALVARENGA et al., 2012). O MDS é baseado em relações matemáticas entre variáveis ambientais e as variáveis de interesse, como por exemplo teor de argila, fertilidade e classe de

solo (variáveis de interesse), e dados topográficos, climáticos, de mais fácil obtenção para toda a área de estudo (variáveis ambientais) (COELHO; GIASSON, 2010).

Diante do exposto, o presente trabalho buscou avaliar a qualidade física do solo, e mapear funções do solo, tais como o crescimento de raízes, o abastecimento de água para as plantas, as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, a resistência à erosão e o potencial de recarga hídrica. Além disso, buscou-se determinar a área mais propícia para a recarga hídrica na bacia de estudo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Mata Atlântica

Florestas no mundo inteiro estão sendo devastadas, causando perda de sua abundância e biodiversidade (BRANCO et al., 2022). Essa devastação pode ocorrer devido a vários fenômenos como a fragmentação dos ambientes naturais, exploração de espécies endêmicas, poluição, mudanças climáticas em escala global, introdução de espécies exóticas, alteração e destruição de habitats (BRANCO et al., 2022; HADDAD et al., 2015; VEIGA; EHLERS, 2003).

Apesar da fragmentação, a Mata Atlântica brasileira exhibe um dos mais elevados níveis de endemismos globais, e aproximadamente metade desses remanescentes estão protegidos dentro de Unidades de Conservação (JOLY et al., 2012).

A Mata Atlântica é um dos mais importantes hotspots mundiais de biodiversidade, ou seja, uma das prioridades para conservação de biodiversidade no mundo (MYERS et al., 2000). Abriga mais de 8.000 espécies endêmicas de plantas vasculares, anfíbios, répteis, aves e mamífero (TABARELLI et al., 2005). É a segunda maior floresta tropical do continente americano, no entanto, é o bioma mais desmatado do país, com apenas 29% de sua cobertura florestal original (MAPBIOMAS, 2021; PINTO et al., 2023). Abrange cerca de 15% do território brasileiro e é lar de 72% da população no Brasil. Em maio de 2023, foi identificado uma perda de 20.075 hectares de florestas nativas nos anos de 2020-2021, ou seja, a área desmatada foi a segunda maior dos últimos 6 anos (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2022).

Em função da degradação desse ecossistema, uma considerável parcela das bacias hidrográficas tem sofrido impactos adversos, resultando em problemas no fornecimento de água à população e desequilíbrios no ambiente (OLIVEIRA FILHO; DUTRA; CERUTI, 2012). Além disso, o conhecimento a respeito da qualidade física do solo é imprescindível para facilitar

a busca por soluções, que minimizem os problemas provocados pelo uso antrópico desenfreado. Além de adotar práticas sustentáveis e um manejo apropriado do solo.

2.2 Uso da terra

Os solos brasileiros têm sofrido degradação desde o início em 1531, à medida que Portugal iniciou a colonização e o país se tornou uma propriedade rural agrícola da coroa portuguesa (DE OLIVEIRA et al., 2017).

O desmatamento é um dos principais problemas que causam a degradação ambiental (PIMENTA et al., 2021). O uso indevido do solo também é responsável por graves problemas ambientais, tais como erosão, e consequentemente escoamento superficial, perda de nutrientes e diminuição da produtividade agrícola (ZONTA et al., 2012).

A erosão elimina de 25 a 40 bilhões de toneladas de solo por ano, reduzindo significativamente o potencial agrícola (SANTOS, 2015). Cerca de 33% dos solos no mundo estão degradados, e na América Latina cerca de 50% estão sofrendo algum tipo de degradação (SANTOS, 2015; SOUZA, FURRIER, LAVOR, 2021).

A qualidade dos corpos d'água está intrinsecamente ligada às características geológicas, ao tipo de solo, às condições climáticas, à cobertura vegetal, à natureza das atividades humanas na respectiva bacia hidrográfica (VALENTE & CASTRO, 1981) e à erosão.

As diferentes atividades de uso e ocupação do solo influencia diretamente o ciclo hidrológico de um rio, pois a utilização inadequada dos solos impacta significativamente a evapotranspiração, taxa de infiltração e serviços hidrológicos (SANTOS et al., 2010). Além disso, alteram os processos biológicos, físicos e químicos dos sistemas naturais (OLIVEIRA-FILHO et al., 2012). Diversas práticas conservacionistas são empregadas para promover maior proteção aos solos e aumentar a infiltração de água, podendo ser de caráter edáfico, mecânico ou vegetativa (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008).

As práticas edáficas se tratam de alterações no sistema de cultivo que contribui para o controle de erosão, e mantêm ou melhoram a fertilidade do solo. Dentre elas pode-se citar adubação verde, controle de queimadas e calagem. As práticas vegetativas se tratam da utilização da vegetação para evitar e mitigar os processos de erosão e a degradação do solo pelo cultivo. Como exemplo dessa prática pode-se citar o cultivo de entorno, cobertura vegetal, cultivo em faixas, rotação de culturas e manejo adequado de pastagem. E por fim, as práticas mecânicas se tratam da utilização de estruturas para manejar o escoamento superficial e reduzir a erosão. Como o terraceamento, plantio em nível e cordões de pedra (BERTOL; DE MARIA; SOUZA, 2018).

A cobertura vegetal contribui positivamente para a infiltração de água no solo, pois a vegetação proporciona melhoria na estrutura, agregação e porosidade do solo (MANCUSO et al., 2014). Dessa forma, deve-se salientar a relevância da cobertura do solo e um adequado manejo dessas áreas, com o intuito de obter melhorias na infiltração de água no solo e evitar problemas de erosão (CAMELO; SANCHES, 2019).

2.3 Bacias hidrográficas

A água é indispensável para a sobrevivência humana, esta apresenta diversas utilidades e está cada vez mais escassa (QUEIROZ et al., 2010). Há grande preocupação com a manutenção deste recurso natural, devido à má distribuição de chuvas, crescimento populacional e utilização de forma inadequada. Em torno de dois bilhões de pessoas no mundo sofrem com a falta de acesso a água potável (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2020).

O manejo e a ocupação das bacias hidrográficas refletem a qualidade e quantidade das águas superficiais e subterrâneas (RANZINI, 1990). Uma bacia hidrográfica se refere a uma área de captação natural de água proveniente das chuvas, que conduz para um único ponto de saída (TUCCI, 1997). Pode ser considerada um sistema integrado que desempenha o papel central onde ocorrem os balanços entre a entrada e saída de água. Esse processo possibilita a delimitação de bacias e sub-bacias, cuja interconexão se dá pelos sistemas hídricos (PORTO; PORTO, 2008).

De acordo com as pesquisas conduzidas por Pinto et al. (2023), foi observado que 7,2% das bacias hidrográficas, representando 4,1% da extensão do bioma Mata Atlântica, apresentam menos de 30% de sua cobertura vegetal nativa original. Sendo que 34% das bacias desse bioma apresentam uma cobertura florestal original inferior a 80%.

Em outro estudo ao observar 146 pontos de coleta de 90 rios e corpos de água dentro do bioma Mata Atlântica, constatou-se que 7% dos rios analisados apresentaram boa qualidade de água, mas 20% se apresentaram de qualidade ruim ou péssima, portanto, imprópria para o uso na agricultura, indústria e consumo humano (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2022).

A investigação sobre a hidrologia de bacias hidrográficas e sua relação com o uso do solo emerge como uma importante necessidade. Esses estudos representam uma demanda atual que visa orientar a implementação de iniciativas voltadas para o desenvolvimento sustentável (SANTOS et al., 2010). Para assegurar a qualidade de água dentro de uma bacia é essencial buscar equilíbrio nas interações entre homem e natureza (PINHEIRO et al., 2014).

Ao inferir sobre o potencial de recarga de água subterrânea também é necessário utilizar índices que relacionam a influência do uso do solo com os atributos ligados à infiltração de

água, e não apenas atributos relacionados à paisagem (ALVARENGA et al., 2012). Ambiente com solos bem conservados, ciclo hidrológico equilibrado, processos hidrológicos funcionando em conformidade, proporcionam melhores condições para que ocorra a reposição do lençol freático, garantindo a integridade das nascentes e conseqüentemente os cursos d'água (CARVALHO et al., 2012). São considerados processos hidrológicos todas as formas de circulação de água no ambiente, dentre elas podem-se citar infiltração, interceptação, evaporação, precipitação, transpiração e escoamento superficial (BITTENCOURT, 2000).

2.4 Qualidade física do solo

A avaliação da qualidade do solo envolve a consideração de três aspectos principais: físico, químico e biológico (ANDRADE et al., 2009). Um índice eficaz, apto para a avaliação de um processo, deve possibilitar comparações com uma condição estabelecida como padrão e ser sensível o suficiente para detectar variações em uma escala pontual, tanto temporal quanto espacialmente (KARLEN et al. 1997).

A Qualidade Física do Solo (QFS) abrange a compreensão de propriedades e processos relacionados à capacidade do solo de manter de maneira eficaz os serviços ecossistêmicos essenciais para a saúde do ecossistema (MEA, 2005). Mais especificamente, na física do solo, a qualidade está associada à capacidade do solo de possibilitar a infiltração, retenção e disponibilização de água para plantas, corpos d'água e zona vadosa (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007). Além disso, o solo deve responder adequadamente às práticas de manejo, resistir à degradação, facilitar as trocas de calor e gases com a atmosfera e as raízes das plantas, e propiciar condições favoráveis para o crescimento das raízes (REICHERT et al., 2003). Esse entendimento é dado por meio dos estudos de indicadores físicos da qualidade do solo (STEFANOSKI et al., 2013).

Os atributos físicos do solo são categorizados como sendo de natureza intermediária ou permanente (DORAN; PARKIN, 1994) ou seja, propriedades ou características, respectivamente. Sendo que as propriedades densidade do solo, resistência à penetração, permeabilidade, aeração, agregação, porosidade e umidade do solo são considerados de natureza intermediária, pois são alteráveis pelo tipo de manejo do solo. As características textura do solo, mineralogia, densidade de partículas e cor, são considerados de natureza permanente por serem características intrínsecas do solo e servem para classificá-lo pedologicamente (STEFANOSKI et al., 2013).

2.5 Indicadores físicos do solo

A qualidade do solo não pode ser totalmente medida de forma direta em campo ou laboratório, portanto utilizam-se inferências a partir de indicadores físicos, químicos e biológicos (CHERUBIN, 2016). Os critérios para a escolha dos indicadores estão relacionados à sua relação entre os atributos e sua eficácia em delinear os processos do ecossistema. Nenhum indicador isolado possibilita a descrição e a quantificação de todos os aspectos da qualidade do solo (STENBERG, 1999).

Algumas propriedades físicas fundamentais para avaliar a qualidade do solo incluem a densidade do solo (D_s) e a taxa de infiltração de água no solo (DORAN & PARKIN, 1994). Solos com boa qualidade estrutural refletem adequada distribuição de poros, boa capacidade de infiltração de água, maior quantidade de macroporos e conseqüentemente menor densidade do solo (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007).

A D_s é a proporção entre a massa de solo seco e o volume total de solo, sendo afetada pela cobertura vegetal, teor de matéria orgânica e práticas de uso e manejo do solo (SILVA et al., 2000). A porosidade total e a D_s , possuem relação inversa, ou seja, quando ocorre degradação ocorre um efeito imediato, aumento da D_s e redução da macroporosidade (ALVES; SUZUKI; SUZUKI, 2007) e da porosidade drenável (MENEZES et al., 2016). A porosidade drenável é caracterizada como a proporção da porosidade total através da qual a água pode fluir livremente, correspondendo ao teor de ar presente no solo na capacidade de campo (BELTRAN, 1986).

A compreensão da porosidade é fundamental para a gestão de solos agrícolas, pois a passagem de maquinaria pesada pode compactar o solo, reduzir sua porosidade e alterar os balanços hídricos, já que a porosidade tem uma influência direta na capacidade de infiltração da água no solo (SILVA et al., 2020). A diminuição da macroporosidade tem um impacto significativo no crescimento do sistema radicular e na taxa de infiltração de água no solo. Isso ocorre devido à criação de condições de baixa aeração (CINTRA et al., 1983).

A resistência à penetração (RP) refere-se à resistência que o solo oferece à penetração das raízes (PABIN et al., 1998). Apresenta uma correlação direta com diversos atributos e condições do solo, tais como textura, densidade, matéria orgânica e, principalmente, a umidade no instante da sua determinação (BUSSCHER et al., 1997; STOLF et al., 1983). Este indicador possibilita a identificação de camadas compactadas, além de revelar alterações nas propriedades físicas do solo ao longo dos distintos horizontes. Tais mudanças podem ser úteis na avaliação da vulnerabilidade do solo aos processos erosivos (REICHERT et al., 2010) e maior dificuldade de desenvolvimento radicular.

O índice de floculação revela o grau de dispersão das partículas do solo, sendo importante na agregação do solo (EMBRAPA, 1997). A floculação é o primeiro passo para a formação de agregados (MENDES; MELLONI; MELLONI, 2006). As partículas de argila e agentes cimentantes, como a matéria orgânica, são importantes para a formação de agregados do solo, portanto, para o índice de estabilidade estrutural do solo (TANG et al., 2022). O índice de estabilidade estrutural (SSI) está relacionado à resistência do solo à compactação e à erosão, sendo um indicador da qualidade estrutural do solo. Se trata de uma métrica que avalia a condição estrutural do solo (PIERI, 1992). Os índices de estabilidade estrutural são classificados de acordo com as faixas de $SSI > 9\%$ (estrutura estável), $7\% < SSI \leq 9\%$ (baixo risco de degradação estrutural), $5\% < SSI \leq 7\%$ (alto índice de degradação) e $SSI \leq 5\%$ (solo estruturalmente degradado) (PIERI, 1992).

Apenas uma pequena fração da água que atinge a superfície do solo alcança o lençol freático. Esse processo envolve armazenamento no solo, disponibilizando água para as raízes das plantas, enquanto outra parte segue o fluxo vertical, principalmente em períodos de excedente hídrico (ROSSATO, 2001). Diversos atributos influenciam na capacidade de armazenamento de água nos solos, como a textura, matéria orgânica e estrutura (SOUSA; ASSUNÇÃO, 2021). Além disso, esses fatores determinam a capacidade de água disponível para as plantas e a capacidade de infiltração de água no solo. A capacidade de água disponível para plantas compreende a faixa de conteúdo de água no solo, indo desde a capacidade de campo, no limite superior, e o ponto de murcha permanente, no limite inferior, salientando que em toda a faixa a água é totalmente e igualmente disponível para as plantas (VEIHMEYER.; HENDRICKSON, 1927).

Um dos atributos que demonstra a capacidade de infiltração de água no solo é a condutividade hidráulica não saturada. A infiltração é o termo utilizado para descrever o processo pelo qual a água penetra na superfície do solo (NERY et al., 2017). Avaliar o comportamento dos processos de infiltração pode ser usado como um indicador dos impactos causados pelas alterações de uso do solo, uma vez que a expectativa é que a modificação no uso do solo influencie o grau de impermeabilização da superfície, alterando assim as condições de infiltração (SILVA et al., 2020).

2.6 Serviços ecossistêmicos do solo

O solo desempenha múltiplas funções, como produção de alimentos, fonte de matéria-prima, sustentação para as plantas, sede de atividades humanas, arquivo histórico, reservatório de biodiversidade, estoque de carbono orgânico e água e regulador do ciclo de nutrientes

(CALZOLARI et al., 2016). Os serviços ecossistêmicos (SEs) podem ser definidos como a capacidade do ecossistema fornecer bens e serviços que satisfaçam as necessidades humanas, de forma direta ou indireta (DE GROOT, 2002).

Podem ser classificados em diferentes categorias (KUMAR, 2010), sendo serviços de produção, serviços de regulação, serviços de apoio e serviços culturais (JÓNSSON; DAVÍDSDÓTTIR, 2016). Serviços de produção, são os produtos que as pessoas obtêm dos ecossistemas, como alimentos, fibra, combustível e água; serviços de regulação são os benefícios que as pessoas obtêm com a regulação de um processo, como a qualidade do ar, purificação da água e regulação do clima; serviços de apoio são a sustentação dos outros serviços, como o suporte para as plantas e formação do solo; serviços culturais são os benefícios imateriais que as pessoas obtêm dos ecossistemas através do desenvolvimento cognitivo, reflexão, recreação e experiências estéticas (MEA, 2005).

Nem todos os solos oferecem SEs suficientes, pois fatores como manejo e utilização inadequada da terra influenciam na qualidade do solo (BÜNEMANN, 2018). Ao realizar boas mudanças nas práticas de manejo, é possível gerar SEs, pois tais serviços não ocorrem de forma isolada, mas sim de forma associada. Boas práticas de manejo e conservação do solo e da água contribuem para o aumento da cobertura no solo melhorando a estrutura, reduzindo a taxa de erosão, e melhorando o movimento de água (MONTEIRO et al, 2017).

Cada vez mais tem-se observado que os estudos sobre SEs estão sendo direcionados para a utilização de parâmetros do solo e da água como potenciais indicadores da provisão de serviços ecossistêmicos. Além disso, a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto para o estudo da associação entre a distribuição espacial das propriedades do solo e o seu potencial de prestação de serviços, vem ganhando espaço na comunidade científica (TURETTA et al., 2017). Principalmente devido à capacidade do sensoriamento remoto possibilitar trabalhar dados em múltiplas escalas temporais e espaciais tornando possível o estudo da correlação entre uso do solo e as funcionalidades ecossistêmicas (MEIRELLES et al., 2007).

2.7 Mapeamento digital de solos

O mapeamento digital de solos (MDS) envolve um conjunto de técnicas e ferramentas que auxiliam no entendimento da variabilidade espacial do solo. O que contribui para estudos voltados para diferentes áreas de atuação, incluindo a conservação do solo, e possibilitando o melhor gerenciamento de recursos naturais (YOSHIDA; STOLF, 2016). Essa ciência visa a gerar e fornecer dados espaciais sobre o solo, utilizando métodos de observação no campo e em laboratório associados a métodos matemáticos (MCBRATNEY et al., 2003).

No MDS a etapa de amostragem é extremamente importante, visto que se busca melhor representatividade e qualidade dos mapas finais. Essa etapa é uma das mais onerosas de todo o trabalho, portanto tem-se utilizado diferentes métodos com o intuito de diminuir os custos e otimizar todo o processo (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014a). Após a coleta de dados em campo, uma das formas de reduzir custos é a possibilidade de utilizar técnicas responsáveis por prever a distribuição espacial dos atributos. Dentre elas pode-se citar, lógica fuzzy, random forest, árvores de decisão, support vector machine, redes neurais artificiais, inverso do quadrado da distância, análises geoestatísticas (VIANA, 2023). Essas técnicas têm grande relevância para a modelagem ambiental e manejo dos solos (CARVALHO JÚNIOR et al., 2014b).

No método tradicional de mapeamento de solos o pedólogo se baseia em modelos conceituais solo-paisagem, e então a partir desses conhecimentos são geradas hipóteses em relação à ocorrência de solos (HUDSON, 1992). O mapeamento de solos tradicional está sujeito à subjetividade do pedólogo e das experiências adquiridas em campo (ARRUDA; DEMATTÊ; CHAGAS, 2013).

A geoestatística é um dos métodos que contribui para o mapeamento de solos e tem sido utilizada para determinar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos do solo, tendo como produto final os mapas (ALVARENGA et al., 2012). Com mapas, é possível tomar decisões mais assertivamente, principalmente nas áreas de agricultura de precisão e análises ambientais (BESKOW et al., 2009). Diversos métodos de interpolação estão disponíveis na literatura, com diferentes níveis de complexidade (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002). Entre eles pode-se citar o método dos vizinhos próximos, inverso do quadrado da distância ou em inglês *Inverse Distance Weight* (IDW).

O IDW determina sua estimativa da variável, atribuindo pesos a cada um dos valores mais próximos ao ponto em que a variável está sendo observada (GARDIMAN et al., 2012). Se trata de uma técnica mais fácil de aplicar, pois se baseia somente na distância entre observações e alguns pesos atrelados a ela (KRAVCHENKO & BULLOCK, 1999). O peso de cada valor é atribuído em função do inverso da potência da distância, logo quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior é o peso a ser atribuído ao valor amostrado (OLIVEIRA JUNIOR, 2016).

Como principal aplicação desses e de vários outros modelos que trabalham de formas bem contrastantes (lógica fuzzy, redes neurais artificiais, random forest) (ALVES, 2008), é comum a predição das classes e propriedades do solo, tornando possível a organização dos conjuntos de dados para análises e interpretações (MCBRATNEY et al., 2003). Dessa forma, o uso dessas técnicas, também se mostram interessantes para mapear os índices de qualidade do

solo. O mapeamento de índices de qualidade do solo com ênfase na recarga hídrica de bacias hidrográficas, têm se tornado uma ferramenta ímpar para o manejo sustentável, possibilitando melhor orientação quanto à utilização de práticas conservacionistas e uso adequado do solo (ALVARENGA et al., 2012).

REFERÊNCIAS

- ALARSA, C. et al. Aspectos do meio físico no cenário dos serviços ecossistêmicos. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 184-195, 2018.
- ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS RA) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1608–1619, nov. 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000500025.
- ALVES, M. C.; SUZUKI, L. G. A. S.; SUZUKI, L. E. A. S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 617-625, 2007.
- ALVES, M. R. **Múltiplas Técnicas no mapeamento digital de solos**. Tese. Escola Superior de Agricultura Luís de Queiroz - Universidade de São Paulo. Piracicaba, 160p, 2008.
- ANDRADE, R. da S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, p. 382-388, 2009.
- ARRUDA, G. P. de; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. da S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 327-338, 2013.
- ANDREWS, S.S. et al. A comparison of soil quality indices methods for vegetable production system in northern California. **Agric. Ecosyst. Environ**, 90: 25–45. 2002
- BRANCO, A. F. V. C. et al. Avaliação da perda da biodiversidade na Mata Atlântica. **Ciência Florestal**, v. 31, p. 1885-1909, 2022.
- BELTRAN, J. M. **Drenaje agrícola**. Madri: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, 1986.
- BERTOL, I.; DE MARIA, I.C.; SOUZA, L.S. (Eds.) **Manejo e Conservação do Solo e da Água**, Viçosa, MG: SBCS, 2018.
- BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**, 7ª Edição, Editora Ícone. São Paulo, SP. 2008, 355p.
- BESKOW, S. et al. Soil erosion prediction in the Grande River Basin, Brazil using distributed modeling. **Catena**, 79:49-59, 2009.

BITTENCOURT, JLG. **Relação entre a ocupação do solo e o comportamento hidrológico de Bacia Hidrológica do Rio Pequeno–São José dos Pinhais–PR**. Dissertação de mestrado. Curitiba–Paraná. UFPR. 197p. 2000.

BÜNEMANN, E. K. et al. Soil quality – A critical review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105-125, 2018.

BUSSCHER, W. J. et al. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, v. 43, n. 3-4, p. 205-217, 1997.

CALZOLARI, C. et al. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. **Geoderma**, v. 261, p. 190-203, 2016.

CAMELO, A. P. S; SANCHES, K. L. Pagamento por serviços ambientais: um instrumento de mitigação dos efeitos de variação climática e uma ferramenta de gestão para crise hídrica na bacia do Alto Descoberto. **Nativa**, v. 7, n. 5, p. 574-581, 2019

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre. PRONI-IPH-UFRGS, 216p, 1986.

CARVALHO, A. P. V.; BRUMATTI, D. V.; DIAS, H. C. T. Importância do manejo da bacia hidrográfica e da determinação de processos hidrológicos. **Revista brasileira de agropecuária sustentável**, 2012.

CARVALHO, J. R. P. de; SILVEIRA, P. M. da; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO JÚNIOR, W. de et al. Evaluation of statistical and geostatistical models of digital soil properties mapping in tropical mountain regions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 706-717, 2014a.

CARVALHO JÚNIOR, W. de et al. Método do hipercubo latino condicionado para a amostragem de solos na presença de covariáveis ambientais visando o mapeamento digital de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 386-396, 2014b.

CHERUBIN, M.R. et al. Soil quality indexing strategies for evaluating sugarcane expansion in Brazil. **PLoS One** 11 (3), e0150860, 2016.

CINTRA, F.L.D.; MIELNICZUK, J.; SCOPEL, I. Caracterização do impedimento mecânico em um Latossolo Roxo do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p.323-327, 1983.

COELHO, F. F.; GIASSON, E. Comparação de métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, v. 40, p. 2099-2106, 2010.

DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. MJ. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. **Ecological economics**, v. 41, n. 3, p. 393-408, 2002.

DE OLIVEIRA, A. B. et al. Cerrado Brasileiro: Um estudo exploratório nas políticas para o seu desenvolvimento. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 3, 2017.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. Defining soil quality for a sustainable environment, v. 35, p. 1-21, 1994.

DOS SANTOS, W. P. et al. Soil quality assessment using erosion-sensitive indices and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 25, p. e00385, 2021.

EMBRAPA, Solos. Manual de métodos de análise de solo. **Rio de Janeiro: Embrapa Solos**, 1997.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA. Observando os Rios 2022. **O Retrato da Qualidade das Águas nas Bacias Hidrográficas da Mata Atlântica**. Disponível em: <https://observandoosrios.sosma.org.br/avaliacoes>. Com acesso em 18 set. 2022.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA & INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). 2022. **Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica e ecossistemas associados no período de 2020–2021**. Fundação SOS Mata Atlântica e INPE, São Paulo.

GARDIMAN, B. S. et al. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES) Analysis of interpolation techniques for spatial rainfall distribution in river basin Itapemirim (ES). **Ambiência**, v. 8, n. 1, p. 61-71, 2012.

HADDAD, N. M. et al. Habitat fragmentation and its lasting impact on Earth's ecosystems. **Science Advances**, [s. l.], v. 1, n. 2, e1500052, mar. 2015.

HUDSON, B. D. The soil survey as paradigm-based science. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 836-841, 1992.

JOLY, C. A. et al. Florística e fitossociologia em parcelas permanentes da Mata Atlântica do sudeste do Brasil ao longo de um gradiente altitudinal. **Biota Neotropica**, v. 12, p. 125-145, 2012.

JÓNSSON, J. Ö. G.; DAVÍÐSDÓTTIR, B. Classification and valuation of soil ecosystem services. **Agricultural Systems**, v. 145, p. 24-38, 2016.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, n. 1, p. 4-10, 1997.

KUMAR, P. (Ed.). **The economics of ecosystems and biodiversity: ecological and economic foundations**. Routledge, 2012.

KRAVCHENKO, A.; BULLOCK, D. G. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. **Agronomy journal**, v. 91, n. 3, p. 393-400, 1999.

LIMA et al. Estimativa do potencial de recarga na sub-bacia das Posses, Extrema (MG), em função dos atributos fisiográficos, pedológicos e topográficos. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 32, n.1, p. 51-62, 2013

MANCUSO, M. A. et al. Características da taxa de infiltração e densidade do solo em distintos tipos de cobertura de solo em zona urbana. **Revista Monografias Ambientais**, p. 2890-2998, 2014.

MCBRATNEY, A.B. et al. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, n.1-2, p.3-52, 2003.

MEA - Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystem and Human Well-being: **A Framework for Assessment. Island Press, Washington DC, USA, 2005.**

MEIRELLES, M. S. P. et al. **Subsídios da Geomática para a Avaliação da Influência da Dinâmica do Uso do Solo nos Serviços Ecológicos**. Meio Ambiente: Experiências em pesquisa multidisciplinar e formação de pesquisadores. Ed. Mauad Ltda, Rio de Janeiro, p. 113-130, 2007.

MENDES, F. G.; MELLONI, E. G. P.; MELLONI, R. Aplicação de atributos físicos do solo no estudo da qualidade de áreas impactadas, em Itajubá/MG. **Cerne**, v. 12, n. 3, p. 211-220, 2006.

MENEZES, M. D. de et al. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha-Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis**, v. 37, n. 82, p. 175-184, 2009.

MENEZES, M. D. DE et al. Spatial prediction of soil properties in two contrasting physiographic regions in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 73, n. 3, p. 274–285, 2016.

MONTEIRO, J. M. G.; ANGELOTTI, F.; SANTOS, M. M de O. **Adaptação e mitigação às mudanças climáticas: contribuição dos serviços ecossistêmicos dos solos**. Boletim informativo da SBCS, 2017.

MYERS, Norman et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853-858, 2000.

NERY, A. R. et al. Infiltração da água nos solos cultivados com palma forrageira e pastagem no IFCE campus Crato. **Revista Acta Kariri-Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 2, n. 1, 2017.

OLIVEIRA-FILHO, P. C.; DUTRA, A. M.; CERUTI, F.C. Qualidade das águas superficiais e o uso da terra: estudo de caso pontual em bacia hidrográfica do oeste do Paraná. **Revista Floresta e Ambiente**, Seropédica, v.19, v.1, jan./mar. 2012.

OLIVEIRA JUNIOR, **Herminio Sabino de. Monitoramento e mapeamento das águas subterrâneas de abastecimento urbano do município de Mossoró-RN.** 2016.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil Till. Res.**, 46:203-208, 1998.

PEREIRA, T. S. R. et al. Determinação e espacialização da perda de solo da bacia hidrográfica do Córrego Cascavel, Goiás. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 9, n. 2, p. 76-93, 2015.

PIERI, J. C. M. G. **Fertility of soils: a future for farming in the west African Savannah**. Berlin: Springer-Verlog, 1992.

PIMENTA, K. K. P.; BIN, A.; SALLES FILHO, S. L. M. Indústria e biodiversidade no Brasil: o novo marco regulatório sobre o uso sustentável da biodiversidade. **Administração de empresas em revista**, v. 2, n. 20, p. 421-441, 2021.

PINHEIRO, A. et al. Relação entre o uso do solo e a qualidade da água em bacia hidrográfica rural no Bioma Mata Atlântica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 3, p. 127-139, 2014.

PINTO, L. F. G. et al. Governance lessons from the Atlantic Forest to the conservation of the Amazon. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 21, n. 1, p. 1-5, 2023.

PORTO, M. F.A; PORTO, R. L. L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos avançados**, v. 22, p. 43-60, 2008.

QUEIROZ, M. M. F. et al. Influência do uso do solo na qualidade da água de uma microbacia hidrográfica rural. **Revista Verde de Agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 5, n. 4, p. 32, 2010.

RANZINI, M. **Balço hídrico, ciclagem geoquímica de nutrientes e perdas de solo em duas microbacias reflorestadas com Eucalyptus Saligna Smith, no Vale do Paraíba, SP**. 1990. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11142/tde-20042016-113241/>. Acesso em: 17 jan. 2024.

REICHERT, J.M. et al. **Mecânica do Solo**. In: LIER, Q.de J.van. Física do Solo. Viçosa: SBCS, 2010.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, p. 29-48, 2003.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil**. São José dos Campos–SP. INPE, 2001.

SANTOS, E. H. M. dos; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. de. Relação entre uso do solo e comportamento hidrológico na Bacia Hidrográfica do Ribeirão João Leite. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 826-834, 2010.

SANTOS, E. Relatório da FAO com participação da Embrapa revela que 33% dos solos do mundo estão degradados. URL: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/8104410/relatorio-da-fao-com-participacao-da-embrapa-revela-que-33-dos-solos-do-mundo-estao-degradados>. Acesso, v. 10, p. 2020, 2015.

SILVA, L. C. M. **Qualidade física do solo, armazenamento de água e erosão hídrica em sistemas de produção de grãos na região central de Minas Gerais**. Dissertação de mestrado. Lavras - Minas Gerais. UFLA. 13p. 2020.

SILVA, M. de O. et al. Indicadores químicos e físicos de qualidade do solo. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 47838-47855, 2020.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J. & REICHERT, J.M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **R. Bras.Ci. Solo**, 24:191-199, 2000.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Composite index for soil-related ecosystem services assessment: Insights from rainforest-pasture transitions in the Colombian Amazon **Ecosystem Services**. v. 57, n. Ago, p. 101463, 2022.

SOUSA, F. A. de; ASSUNÇÃO, H. F. da. Capacidade de Armazenamento de Água no Solo (CAD) e Características Físicas dos Solos na Avaliação da Distribuição da Água das Chuvas na Alta Bacia do Ribeirão Santo Antônio. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 06, p. 3635-3647, 2021.

SOUZA, A. dos S.; FURRIER, M.; LAVOR, L. F. de. Solos nos livros didáticos: contextualização e proposta de mapas didáticos. **Terrae Didatica**, Campinas, SP, v. 17, n. 00, p. e021010, 2021. DOI: 10.20396/td.v17i00.8663686. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8663686>.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Section B-plant Soil Science, v. 49, n. 1, p. 1-24, 1999.

STOLF, R. **Recomendação para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf**. Kamaq Máquinas e Implementos Agrícolas, 1983.

TABARELLI, M. et al. Desafios e oportunidades para a conservação da biodiversidade na Mata Atlântica brasileira. **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, p. 132-138, 2005.

TANG, X. et al. Responses of soil aggregate stability to organic C and total N as controlled by land-use type in a region of south China affected by sheet erosion. **Catena**, v. 218, p. 106543, 2022.

TUCCI, C. E. M. 1997. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/ Editora da UFRGS, 1997. (Col. ABRH de Recursos Hídricos, v.4).

TURETTA, A. P. D.; DE CASTRO, S. S.; POLIDORO, J. C. **Solos, sustentabilidade e provisão de serviços ecossistêmicos**. Boletim informativo da SBCS, 2017.

VALENTE, O.F. & CASTRO, P. S. **Manejo de bacias hidrográficas. Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 7, n. 80, p. 40-45, mar. 1981.

VEIGA, J. E.; EHLERS, E. Diversidade biológica e dinamismo econômico no meio rural. In: MAY, P. H.; LUSTOSA, M. C.; VINHA, V. (org.). Economia do meio ambiente: teoria e prática. Rio de Janeiro: **Elsevier**, p. 289-308, 2003.

VEIHMEYER, F. J.; HENDRICKSON, A. H. Soil-moisture conditions in relation to plant growth. **Plant physiology**, v. 2, n. 1, p. 71, 1927.

VIANA, P. R. N. **Análise dos macronutrientes do solo sob enfoque multiespectral**. Dissertação de mestrado. Chapadão do Sul – Mato Grosso do Sul. UFMS - Câmpus de Chapadão do Sul, 20p, 2023.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **2.1 billion people lack safe drinking water at home, more than twice as many lack safe sanitation**, 2020. Disponível: <https://www.who.int/newsroom/detail/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation>.

YOSHIDA, F. A.; STOLF, R. Mapeamento digital de atributos e classes de solos da UFSCar-Araras/SP. **Revista Ciência, Tecnologia & Ambiente**, v. 3, n. 1, p. 1-11, 2016.

ZONTA, J. H. et al. **Práticas de conservação de solo e água**. 2012. Disponível: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/928493/1/CIRTEC133tamanhografica2.pdf> (embrapa.br).

SEGUNDA PARTE – ARTIGO

Artigo:

Mapeamento de funções do solo em bacia hidrográfica no bioma Mata Atlântica

Artigo formatado nas normas da ABNT (versão preliminar)

RESUMO

Grande parte dos solos mundiais estão degradados, levando a preocupações, como a escassez de água. Logo, o manejo sustentável do solo é fundamental por adotar métodos práticos de monitoramento da dinâmica do solo e da água em bacias hidrográficas. Os índices de qualidade física do solo são sensíveis às mudanças ambientais causadas por ações humanas e representam uma alternativa viável de monitoramento desse fator ao longo das áreas. Neste sentido, o mapeamento digital de solos oferece alternativas à dificuldade de acesso às áreas de estudo e redução de custos de trabalhos de campo para esta finalidade. Este estudo avaliou o Índice de Qualidade Física do Solo (IQFP) em uma bacia hidrográfica no *campus* da Universidade Federal de Lavras (MG, Brasil), buscando mapear as funções do solo para identificar áreas propícias à recarga hídrica. Foram estabelecidos 17 pontos georreferenciados em uma grade regular em área de 9 ha, com amostragens em mata de regeneração e agricultura. Cada ponto de amostragem foi espaçado por 70 m. Foram avaliados indicadores como densidade do solo, textura, condutividade hidráulica, matéria orgânica do solo, porosidade, resistência à penetração e infiltração de água. Os índices foram calculados e mapeados pelo método Inverse Distance Weigthing, indicando áreas mais adequadas para recarga hídrica na bacia, considerando uma escala de 1:2.000. Neste estudo, conclui-se que na profundidade de 0-10 cm do solo, os maiores valores de Índices de Qualidade Física do Solo (IQFS) foram observados na área de mata de regeneração. Essa área destaca-se pela maior qualidade física do solo, influenciando positivamente em estoque de carbono, taxa básica de infiltração (TBI), funções como trocas gasosas, abastecimento de água para plantas, resistência à erosão e potencial de recarga hídrica. Esses resultados indicam que a mata de regeneração é responsável pela maioria dos serviços ecossistêmicos analisados.

Palavras-chave: Uso do solo, atributos do solo, saúde do solo, serviços ecossistêmicos do solo

ABSTRACT

Much of the world's soil is degraded, leading to concerns such as water scarcity. Therefore, sustainable soil management is fundamental by adopting practical methods for monitoring soil and water dynamics in river basins. Soil physical quality indices are sensitive to environmental changes caused by human actions and represent a viable alternative for monitoring this factor across areas. In this sense, digital soil mapping offers alternatives to the difficulty of accessing study areas and reduces the costs of fieldwork for this purpose. This study evaluated the Soil Physical Quality Index (IQFP) in a river basin on the campus of the Federal University of Lavras (MG, Brazil), seeking to map soil functions to identify areas suitable for water recharge. 17 georeferenced points were established in a regular grid in an area of 9 ha, with sampling in regeneration and agricultural forests. Each sampling point was spaced 70 m apart. Indicators such as soil density, texture, hydraulic conductivity, soil organic matter, porosity, resistance to penetration and water infiltration were evaluated. The indices were calculated and mapped using the Inverse Distance Weighing method, indicating the most suitable areas for water recharge in the basin, considering a scale of 1:2,000. In this study, it is concluded that at a depth of 0-10 cm from the soil, the highest values of Soil Physical Quality Indexes (IQFS) were observed in the regeneration forest area. This area stands out for the higher physical quality of the soil, positively influencing carbon stock, basic infiltration rate (TBI), functions such as gas exchange, water supply for plants, erosion resistance and water recharge potential. These results indicate that the regeneration forest is responsible for the majority of the ecosystem services analyzed.

Keywords: Land use, Soil attributes, soil health, soil ecosystem services

1 INTRODUÇÃO

O solo é um importante recurso natural fundamental à manutenção da vida no planeta, responsável pelo armazenamento de água, produção de biomassa, armazenamento de carbono, produção de alimentos e ciclagem de nutrientes (CALZOLARI et al., 2016; SAFAEI et al., 2019). A cada ano, a demanda mundial por produção de alimentos aumenta devido ao crescimento populacional (PASSINATO et al., 2021). Um dos maiores desafios enfrentados é produzir alimentos de forma sustentável, degradar minimamente o ambiente, além de manter a qualidade e a saúde do solo (CARDOSO et al., 2013).

A qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do funcionamento eficaz do solo dentro de suas condições naturais e do sistema produtivo, sustentando a produtividade vegetal e animal, mantendo a qualidade da água, do ar e da saúde humana (KARLEN et al., 1998). O método proposto por Karlen et al. (1994) é um dos mais utilizados para determinar os índices de qualidade do solo, em que suas principais funções e indicadores são escolhidos de acordo com sua importância para determinação do índice (Alvarenga et al., 2012).

Um dos serviços ecossistêmicos de grande relevância prestados pelo solo é a função de armazenamento de água. Isso é fundamental para garantir a recarga de aquíferos e fornecer água aos grandes centros urbanos (PRADO et al., 2022), principalmente devido ao atual cenário de crise hídrica no Brasil. A má distribuição das chuvas no país, resultam em problemas de abastecimento às grandes cidades e desastres ambientais (ZILLI et al., 2017), além de afetar a produção de alimentos.

Os diferentes usos da terra podem ter impacto positivo ou negativo sobre as funções hidrológicas do solo (RODRIGUEZ et al., 2021). Além disso, o armazenamento de água e os processos de erosão podem ser os principais serviços afetados pelo seu uso inadequado (GRIMALDI et al., 2014). O solo, quando mal manejado, sofre alterações em diversos atributos físicos, como a agregação, estrutura e porosidade (SILVA et al., 2013), podendo ocasionar compactação do solo, resultando em problemas como o comprometimento do transporte e armazenamento de água e nutrientes, bem com processos erosivos.

Diversos indicadores físicos podem ser usados para avaliar a qualidade do solo. Dessa forma, pode-se concentrar na qualidade física do solo (QFS) para avaliar mudanças no solo (BARBOSA et al., 2019; SANTANA et al., 2023) e no auxílio para definição de práticas de manejo sustentável. Normalmente as propriedades físicas se correlacionam e a alteração de uma delas pode resultar na alteração de outras propriedades (STEFANOSKI et al., 2013)

Um dos desafios em praticar o manejo sustentável é a dificuldade em estabelecer os locais específicos para cada prática, uma vez que, para isso, é necessária a caracterização do

solo ao longo das áreas de interesse. Neste contexto, métodos de geoestatística têm apresentado resultados bastante eficazes (CÂNDIDO et al., 2015). O mapeamento dos IQFS é útil como suporte para avaliação do manejo sustentável em bacias hidrográficas, pois confere melhor direcionamento na tomada de decisão relacionado ao uso da terra e às práticas conservacionistas (ALVARENGA et al., 2012). Embora haja diversas pesquisas sobre os IQFS, ainda não se encontram completamente elucidadas informações que relacionam áreas aptas à recarga hídrica por meio de mapeamento e índices de qualidade. Compreender as interações entre o uso do solo e os serviços ecossistêmicos é fundamental para orientar a sociedade a respeito da utilização sustentável das áreas produtivas.

Neste trabalho, buscou-se acessar os atributos físico-hídricos ligados aos serviços ecossistêmicos do solo de uma bacia hidrográfica localizada na Universidade Federal de Lavras, representativa da região de estudo em termos de classes de solos, materiais de origem e usos do solo. Objetivou-se avaliar a qualidade física do solo através do IQFS e mapear as diferentes funções do solo (crescimento de raízes, abastecimento de água para as plantas, trocas gasosas entre solo e atmosfera, resistência à erosão e potencial de recarga das águas subterrâneas) e determinar a área mais apta à recarga hídrica. Tem-se como hipóteses que a área de mata de regeneração tem melhor qualidade física do solo e maior potencial de recarga hídrica do que a área de pousio.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudos

O estudo foi conduzido em uma bacia hidrográfica, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais (Figura 1), representativa da região em termos de classes de solo (Figura 2), materiais de origem e usos do solo (Figura 3). A área de estudo tem o total de 9,137 ha e compreende dois usos diferentes do solo – mata de regeneração e pousio. De acordo com a classificação Köppen, o clima da região é do tipo Cwa, temperado chuvoso (inverno frio e seco e verão quente e úmido) (DANTAS et al., 2007) e a vegetação dominante da região é Mata Atlântica. A precipitação média anual é de 1.530 mm e temperatura média entre 22,5 °C e 15,8 °C (ALVARES et al., 2013).

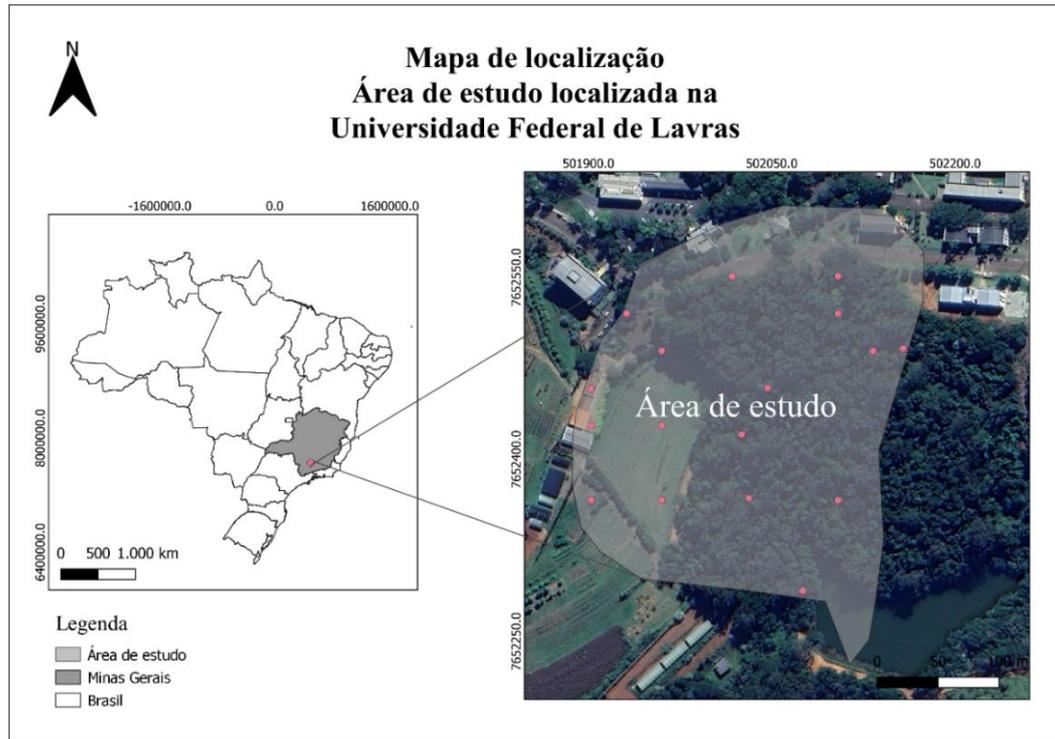


Figura 1: Área da bacia hidrográfica, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais.

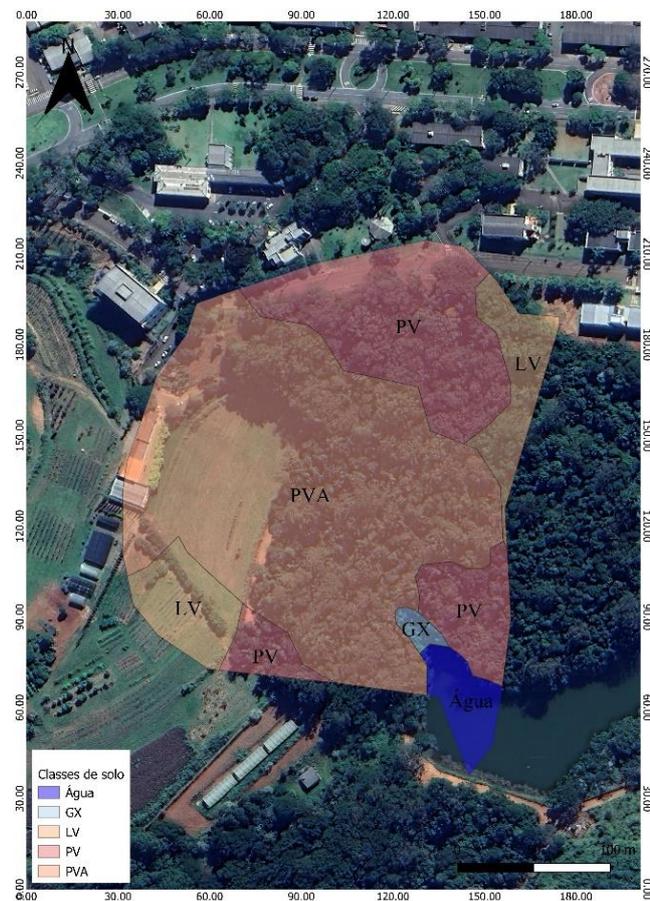


Figura 2: Classes de solo da bacia hidrográfica de estudo, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais (SILVA 2023).

Estabeleceu-se uma grade regular, totalizando 17 pontos amostrais georreferenciados para as coletas de solos ao longo da bacia (Figura 1). Logo, foram realizadas amostragens em 12 pontos na mata de regeneração e 5 pontos no pousio, com os pontos espaçados entre si por 70 m. Para cada ponto, foram amostrados nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm.

Em cada um dos horizontes, foi coletada uma amostra deformada para determinar a textura pelo método da pipeta e o teor de matéria orgânica conforme preconiza a metodologia padrão do Manual de métodos de análise de solo proposto por Texeira et al. (2017). Também, em cada um dos horizontes, foram coletados um cilindro com dimensões 2,5 x 6,5 cm para mensurar a densidade do solo pelo método dos cilindros, macroporosidade, microporosidade e capacidade de água disponível, e um cilindro de aço com dimensões 7,5 x 6,0 cm para quantificar a condutividade hidráulica saturada. Além disso, foi determinada a resistência do solo à penetração até a profundidade de 60 cm (5 réplicas). A taxa de infiltração (3 réplicas) foi avaliada ao redor de cada ponto de amostragem.

A densidade do solo (D_s) foi obtida pelo método dos cilindros volumétricos (TEXEIRA et al., 2017). Os cilindros foram coletados utilizando o amostrador tipo Uhland, e em laboratório foram feitos os procedimentos conhecidos como toaleta e, posteriormente, a saturação. Em seguida o peso saturado do conjunto amostra e cilindro foi determinado e então o monólito foi submetido ao potencial matricial de 6 Kpa. Após cessar a drenagem, removeu-se o monólito e o seu peso foi determinado. O monólito foi para estufa a 105 °C, até peso constante, e determinou-se o peso seco. Nesse procedimento, também foram calculados a macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) e porosidade total (Pt). A D_s foi calculada pela seguinte equação:

$$D_s = \frac{m_s}{V}$$

Onde D_s é densidade do solo (g cm^{-3}), m_s é a massa da amostra de solo seco (g) e V é o volume do cilindro, em cm^3 .

A Mac foi calculada pela seguinte equação:

$$\text{Mac} = \text{Pt} - \text{Mic}$$

Onde Mac é a macroporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), Pt é a porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) e Mic é a microporosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A Pt foi calculada pela seguinte equação:

$$P_t = \frac{[(a-b)-(c-d)]}{e}$$

Onde P_t é a Porosidade total ($m^3 m^{-3}$), a é a massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-liga saturado (kg), b é a massa do conjunto amostra-cilindro-tecido-elástico seco a 105 °C (kg), c é a massa do conjunto cilindro-tecido-elástico saturado (kg), d é a massa do conjunto cilindro-tecido-liga seco a 105 °C (kg), e é o volume total da amostra (m^3).

A Mic foi calculada pela seguinte equação:

$$Mic = \frac{(a-b)}{c}$$

Onde Mic é a Microporosidade ($m^3 m^{-3}$), a é a massa do solo seco + água retida, após equilíbrio com um potencial de 6 kPa (g), b é a massa do solo seco a 105 °C (g), c é o volume total da amostra (cm^3).

A capacidade de água disponível para a planta (CAD) foi calculada pela diferença entre o teor de água na capacidade de campo (CC) e no ponto de murcha permanente (PMP) (WHITE, 2006), utilizando CC baseada no teor de água de equilíbrio no potencial matricial de -10 kPa e o PMP no teor de água de equilíbrio no potencial matricial de -1500 kPa.

A capacidade de campo relativa (RFC) foi determinada conforme Reynolds et al. (2008), utilizando a seguinte equação:

$$RFC = \frac{\theta_{CC}}{\theta_S} = 1 - \frac{\theta_{CA}}{\theta_S}$$

Onde θ_{CC} ($m^3 m^{-3}$) é o teor de água na capacidade de campo, θ_S ($m^3 m^{-3}$) é o teor de água em saturação, e θ_{CA} ($m^3 m^{-3}$) é a capacidade de aeração.

A Porosidade drenável, foi calculada de acordo com Otto (1988), utilizando a seguinte equação:

$$PD = \theta_s - \theta_{cc}$$

Onde PD é a porosidade drenável ($m^3 m^{-3}$); θ_s é a umidade na saturação ($m^3 m^{-3}$); θ_{cc} é a umidade na capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$).

O coeficiente de permeabilidade (K) foi determinado em laboratório por meio dos ensaios de carga constante ou de carga variável (BOWLES, 1986; STANCATI, NOGUEIRA e VILAR, 1981).

Calculou-se o coeficiente de permeabilidade (K) através da expressão:

$$K = \frac{(VL)}{(AHt)}$$

Onde, V = volume de água percolado no tempo t , em cm^3 ; L = altura do corpo de prova, em cm ; A = área do corpo de prova, em cm^2 ; H = altura de carga, cm ; t = tempo decorrido para percolar o volume V , em segundos.

Calculou-se o coeficiente de permeabilidade a $20\text{ }^\circ\text{C}$ usando a expressão:

$$K_{20} = KT \frac{\mu T}{\mu_{20}}$$

Onde, K_{20} é o coeficiente de permeabilidade a $20\text{ }^\circ\text{C}$; KT é o coeficiente de permeabilidade a $T\text{ }^\circ\text{C}$; μT é a viscosidade da água a $T\text{ }^\circ\text{C}$; μ_{20} é a viscosidade da água a $20\text{ }^\circ\text{C}$.

A condutividade hidráulica não saturada foi estimada pelo método proposto por Zhang (1997) com auxílio do Infiltrômetro de Mini Disk, sendo posicionado na superfície do solo para as medições. As leituras foram tomadas a cada trinta segundos, iniciadas no tempo 0 o volume inicial. Este método requer a medição da infiltração cumulativa versus tempo, ajustando os resultados com a seguinte função:

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2t$$

Onde C_1 (m s^{-1}) e C_2 (m s^{-1}) são parâmetros. C_1 está relacionado à sorptividade do solo e C_2 é a condutividade hidráulica. A condutividade hidráulica não saturada do solo (K) foi calculada a partir de:

$$K = \frac{C_1}{A}$$

Onde C_1 é a inclinação da curva da infiltração cumulativa em relação à raiz quadrada do tempo e A é um valor que relaciona os parâmetros de van Genuchten (1980) para cada tipo de solo com a taxa de sucção em $2,0\text{ cm}$ e o raio do disco do infiltrômetro em $2,25\text{ cm}$. Os parâmetros de van Genuchten (1980) para as 12 classes de textura foram obtidos de Carsel e Parrish (1988). Calculou-se A , a partir das seguintes equações:

$$A = \frac{11,65(n^{0,1}-1)\exp[2,92(n-1,9)ah_0]}{(ar_0)^{0,91}}$$

$$A = \frac{11,65(n^{0,1}-1)\exp[7,5(n-1,9)ah_0]}{(ar_0)^{0,91}}$$

n e α são os parâmetros de van Genuchten para o solo, r_0 é o raio do disco ($2,25\text{ cm}$) e h_0 é a sucção na superfície do disco ($2,0\text{ cm}$).

Foi realizado o ensaio de resistência à penetração (RP), utilizando um penetrômetro de impacto dinâmico com ponta cônica (STOLF *et al.* 2014), atingindo uma profundidade de 60 cm. O procedimento foi efetuado de acordo com o recomendado e descrito por Stolf (1991) e Vaz *et al.* (2011). Foram selecionados cinco pontos de repetição para cada ponto de amostragem com o objetivo de avaliar a resistência mecânica do solo. Foram coletadas amostras deformadas nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 cm com o auxílio de um trado holandês para a umidade do solo em cada ponto amostral, logo, foi determinada pelo método gravimétrico. Os dados de RP foram calculados utilizando uma planilha eletrônica (STOLF *et al.*, 2014).

O índice de estabilidade estrutural (SSI), dado em %, é utilizado para determinar o quão está a degradação da estrutura do solo (REYNOLDS *et al.*, 2009).

$$SSI = \frac{MOS}{(\text{Silte} + \text{argila})} \times 100$$

Onde MOS é a matéria orgânica do solo.

2.2 Cálculo do índice de qualidade física do solo (IQFS)

Para determinar o índice de qualidade física do solo, os atributos foram considerados conforme a sua principal função no solo relacionadas aos serviços ecossistêmicos, sendo: 1º - apoio ao crescimento das raízes (cresc. raiz); 2º - fornecimento de água para as plantas (água de abastecimento); 3º - facilitação das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera (permitir trocas gasosas); 4º - resistência à erosão (resist. erosão); e 5º - potencial de recarga das águas subterrâneas (potencial de recarga).

Um conjunto essencial de dados composto por dez indicadores físicos do solo foram selecionados, pois o custo de considerar todas as propriedades do solo não é viável (Alvarenga *et al.*, 2012; Cherubin *et al.*, 2016). Conforme Cândido *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2021), esses indicadores físicos foram empregados para calcular o IQFS. Para a função cresc. raiz foram utilizados a densidade do solo (DS) e a resistência à penetração (RP). Para a função de fornecimento de água (água de abastecimento), foram considerados a condutividade hidráulica saturada (Ksat), a capacidade de água disponível para as plantas (CAD) e a capacidade de campo relativa (RFC). Para a função de facilitação das trocas gasosas (permitir troca gasosa), foram empregados a macroporosidade (Mac) e o índice de estabilidade estrutural. Para a função de resistência à erosão (resist. erosão), foram aplicados o índice de floculação (IF), o índice de estabilidade estrutural (SSI) e a taxa básica de infiltração (TBI). Por fim, para a função de

potencial de recarga (potencial de recarga), foram considerados a porosidade drenável (PD), a taxa básica de infiltração (TBI) e a condutividade hidráulica saturada (Ksat) (Tabela 1).

Tabela 1: Funções do solo relacionadas a cada atributo físico empregado para calcular os índices de qualidade física do solo, da bacia hidrográfica estudada, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais.

Funções do solo	Atributos	Peso de cada indicador
Apoio ao crescimento das raízes (cresc. raiz)	(Ds); (RP)	0,085
Fornecimento de água para as plantas (água de abastecimento)	(Ksat); (CAD); (RFC)	0,057
Facilitação das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera (permitir trocas gasosas)	(Mac); (SSI)	0,085
Resistência à erosão (resist. erosão)	(IF); (SSI); (TBI)	0,057
Potencial de recarga das águas subterrâneas (potencial de recarga)	(PD); (TBI); (Ksat).	0,107

Ds: Densidade do solo, RP: resistência à penetração, Ksat: condutividade hidráulica saturada, CAD: capacidade de água disponível para as plantas e RFC: capacidade de campo relativa, Mac: Macroporosidade, SSI: índice de estabilidade estrutural, IF: índice de flocculação, PD: porosidade drenável, TBI: taxa básica de infiltração.

Devido à diferença de unidades entre os indicadores, foram utilizadas funções de pontuação padrão (FPP), para padronizar os dados do solo, transformando cada valor observado em um valor adimensional, variando de 0 a 1. A partir da qualidade do solo, foram definidas funções do tipo “mais é melhor”, “menos é melhor” e ótimo. Os indicadores foram classificados em “mais é melhor” para Mac, Ksat, SSI, TBI, IF e DP; em “menos é melhor” para DS e PR; e, em “ótimo” para CAD e RFC. Os valores máximos e mínimos de cada indicador foram considerados como limites superiores e inferiores (REYNOLDS et. al., 2009; REYNOLDS et al., 2008). Os valores obtidos foram utilizados na FPP para normalizar os resultados de cada indicador em cada amostra de solo conforme Cândido et al. (2015) (Tabela 2).

Tabela 2: Funções de pontuação padrão e parâmetros indicadores utilizados nos cálculos dos índices de qualidade física do solo, da bacia hidrográfica estudada, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais.

Indicador	Tipo de Função ⁽¹⁾	L	U	FPP ⁽²⁾
Mac	MB	0,06	1,50	MB: N(x) $\begin{cases} 0,1 & x \leq L \\ 0,9 \frac{x-L}{U-L} + 0,1 & L < x < U \\ 1 & x \geq U \end{cases}$
Ksat	MB	0,03	480,7	
SSI	MB	0,60	15,0	LB: N(x) $\begin{cases} 1 & x \leq L \\ 1 - 0,9 \frac{x-L}{U-L} & L < x < U \\ 0,1 & x \geq U \end{cases}$
TBI	MB	2,18	85,61	
IF	MB	8,94	50,76	O: N(x) $\begin{cases} 0,1 & x \leq L1 \text{ ou } x \geq U2 \\ 0,9 \frac{x-L1}{L2-L1} + 0,1 & L1 < x < L2 \\ 1 & L2 \leq x \leq U1 \\ 0,9 \frac{x-U1}{U1-U2} + 0,1 & U1 < x < U2 \end{cases}$
DP	MB	0,08	0,34	
Ds	LB	0,77	1,63	
RP	LB	0,71	3,13	
CAD	O	0,004	0,24	
RFC	O	0,19	0,85,	

Mac: Macroporosidade, Ksat: condutividade hidráulica saturada, SSI: índice de estabilidade estrutural, TBI: taxa básica de infiltração, IF: índice de floculação, PD: porosidade drenável, Ds: densidade do solo, RP: resistência à penetração, CAD: capacidade de água disponível para as plantas e RFC: capacidade de campo relativa.

⁽¹⁾Tipos de Função: mais é melhor (MB), menos é melhor (LB) e ótimo (O).

⁽²⁾ Funções de Pontuação Padrão (FPP), nessas duas equações x é o valor do indicador; N (x) é a pontuação do indicador variando entre 0,1 e 1; L e U são os valores dos limites inferiores e superiores, respectivamente.

Para obter o IQFS, foram atribuídos pesos aos indicadores de acordo com a relevância de cada um destes indicadores relacionados aos serviços ecossistêmicos. Com base na literatura (RINOT et al., 2019), foram atribuídos pesos diferentes de acordo com a maior influência em cada função. Para as funções apoio ao crescimento das raízes, fornecimento de água para as plantas, facilitação das trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, resistência à erosão foram atribuídos os pesos de 0,17 e para potencial de recarga das águas subterrâneas foi atribuído o peso de 0,32. Foi dado maior importância a esta função devido ao objetivo de avaliar o potencial de recarga da bacia estudada.

O IQFS foi calculado para todos os tratamentos de acordo com a equação 1:

$$IQFS = \sum_{i=1}^n W_i N_i \quad (1)$$

Em que W_i é o peso de cada indicador; e N_i , a pontuação do indicador.

2.3 Análises de correlação

Visando selecionar variáveis e estabelecer uma correlação entre os indicadores físicos do solo, os horizontes e os usos do solo, foi realizada análise de correlação de Pearson ($P < 0,05$), e posteriormente, prosseguiu-se com a análise de componentes principais (PCA). Para a análise

dos dados, foram empregadas as bibliotecas “Corrplot” versão 1.2.2 (FRIENDLY, 2002) no ambiente de desenvolvimento do RStudio (R CORE TEAM, 2024).

2.4 Interpolação espacial

Para se definir a técnica para espacialização dos atributos ao longo da área de estudo, foram testadas as técnicas de interpolação krigagem ordinária e ponderação de distância inversa (IDW). Posteriormente, foi utilizada a estatística de Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), determinada através de validação cruzada, para se calcular a qualidade preditiva. Ou seja, menores valores de RMSE implicam maior qualidade preditiva. Deste modo, a técnica escolhida para interpolação foi o IDW, por apresentar menores valores de RMSE. A espacialização dos dados foi efetuada com o auxílio do software QGIS 3.28 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2023).

O método IDW assume que os valores interpolados são influenciados mais fortemente por pontos de dados próximos do que por pontos mais distantes (SOARES et al., 2014). A ponderação é inversamente proporcional à distância, o que significa que pontos mais próximos têm um peso maior na estimativa do valor interpolado. A fórmula geral para o IDW é dada por:

$$Z_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

Onde, Z_0 é o valor interpolado no local de interesse; Z_i é o valor conhecido no ponto de dados i ; d_i é a distância entre o ponto de dados i e o local de interesse; p é um parâmetro que controla o poder da ponderação. Quando $p = 2$, a ponderação segue uma lei do inverso do quadrado da distância.

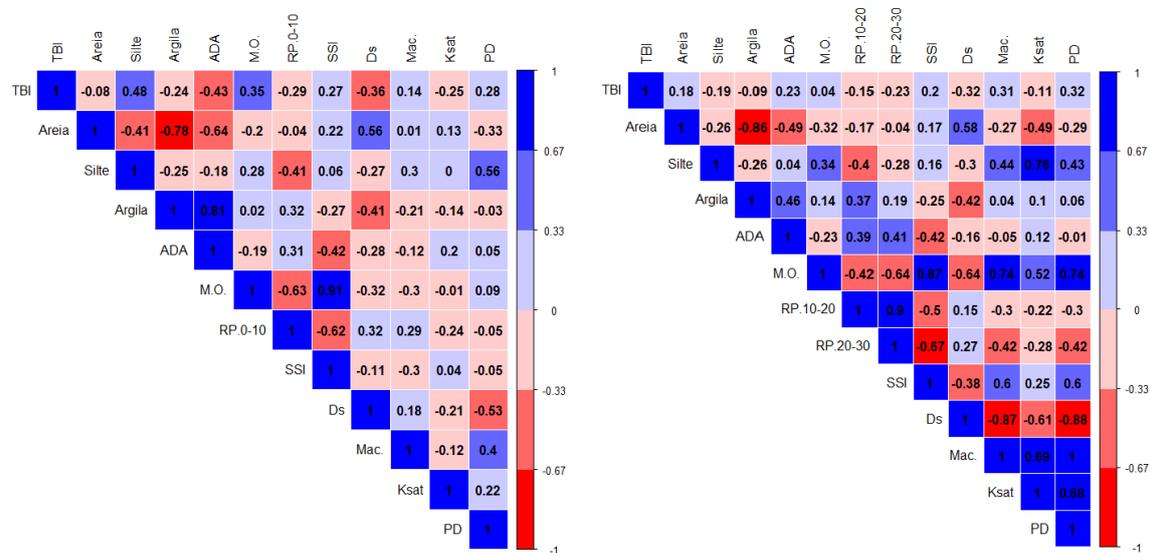
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na profundidade de 0-10 foi observada uma correlação negativa entre taxa básica de infiltração (TBI) e a argila dispersa em água (ADA), ao passo que houve uma correlação positiva com a matéria orgânica (MO) (Figura 3). Conforme observado por Bedbabis et al. (2014), a diminuição da taxa de infiltração de água no solo pode ser explicada devido ao alto teor de argila dispersa em água. O impacto das gotas da chuva, principalmente em áreas sem cobertura resultam em selamento superficial que bloqueiam a conectividade de parte dos poros

(REICHERT, 1987). A presença de argila dispersa em água tem impactos negativos na estrutura do solo, causando maior susceptibilidade à erosão, afetando assim a capacidade do solo de infiltrar água (BEDBABIS et al., 2014). Logo, tem consequências importantes para a hidrologia do local, influenciando a disponibilidade de água para as plantas e a recarga de aquíferos. Foi observada uma correlação negativa entre TBI e a resistência à penetração (RP) na profundidade de 10-20 cm e também a com a densidade do solo (Ds). Este comportamento foi semelhante ao observado por Souza e Alves (2003), que identificaram alterações na taxa de infiltração de água devido à grande influência da RP, ou seja, solos com maior RP geralmente apresentaram menor capacidade de infiltrar água.

Na profundidade de 10-20 cm (Figura 3), observou-se correlação positiva entre MO e SSI, provavelmente a MO atuar como agente cimentante e promover agregação ao solo tornando-o melhor estruturado, conforme corroborado nos estudos de Bochner et al. (2008).

Figura 3 - Correlação de Pearson da profundidade de 0-10 à esquerda e profundidade de 10-20 à direita da bacia hidrográfica estudada, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais.



TBI: Taxa básica de infiltração, Areia, Silte, Argila, ADA: Argila dispersa em água, MO: Matéria orgânica, RP 0-10: resistência à penetração na profundidade de 0 a 10 cm, RP 10-20: resistência à penetração na profundidade de 10 a 20 cm, RP 20-30: resistência à penetração na profundidade de 20 a 30 cm SSI: Índice de estabilidade estrutural, Ds: densidade do solo, Mac: Macroporosidade, Ksat: Condutividade hidráulica saturada, PD: Porosidade drenável.

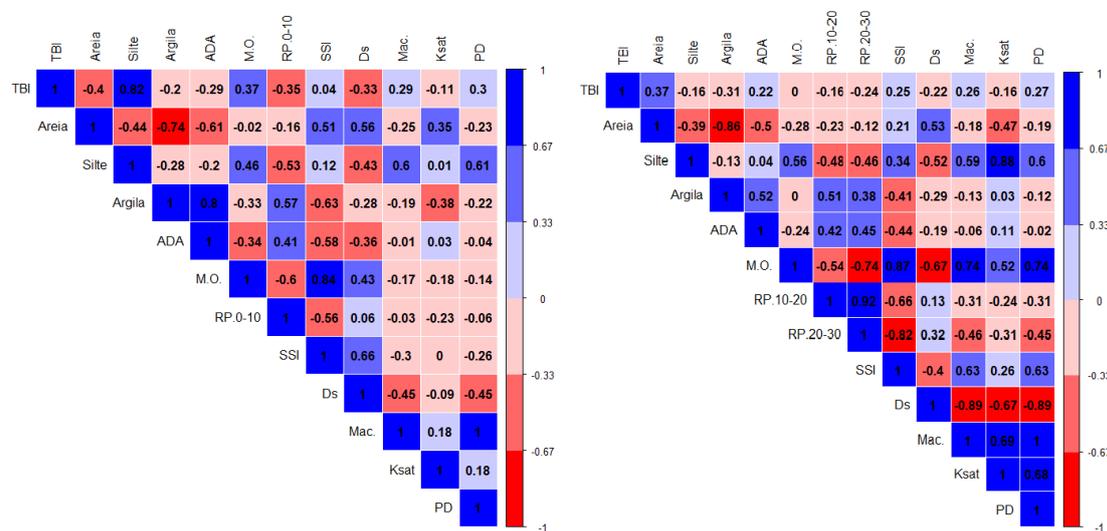
Fonte: Da autora (2023)

Observando cada profundidade por uso, constatou-se que a profundidade 0-10 (Figura 4) da mata de regeneração apresentou correlação negativa entre TBI e RP e Ds. A presença de resistência à penetração na área de mata de regeneração, deve-se possivelmente a maior

cobertura de Argissolo Vermelho e Argissolo Vermelho Amarelo neste uso. A TBI apresentou ainda correlação positiva com a matéria orgânica.

Na profundidade de 10-20 cm da mata de regeneração (Figura 4), observou-se que a TBI obteve correlação positiva com areia. A textura do solo é um dos fatores que influenciam diretamente a infiltração de água no solo, solos arenosos tendem a ter maior infiltração do que os solos argilosos (ALMEIDA JÚNIOR et al., 2020). Solos arenosos têm mais macroporos, e, devido à menor tortuosidade das partículas de areia, a infiltração ocorre de forma mais rápida.

Figura 4 - Correlação de Pearson da profundidade de 0-10 cm à esquerda e profundidade de 10-20 à direita da bacia hidrográfica da Mata de regeneração, na bacia hidrográfica estudada, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais.



TBI: Taxa básica de infiltração, Areia, Silte, Argila, ADA: Argila dispersa em água, MO: Matéria orgânica, RP 0-10: resistência à penetração na profundidade de 0 a 10 cm, RP 10-20: resistência à penetração na profundidade de 10 a 20 cm, RP 20-30: resistência à penetração na profundidade de 20 a 30 cm SSI: Índice de estabilidade estrutural, Ds: densidade do solo, Mac: Macroporosidade, Ksat: Condutividade hidráulica saturada, PD: Porosidade drenável.

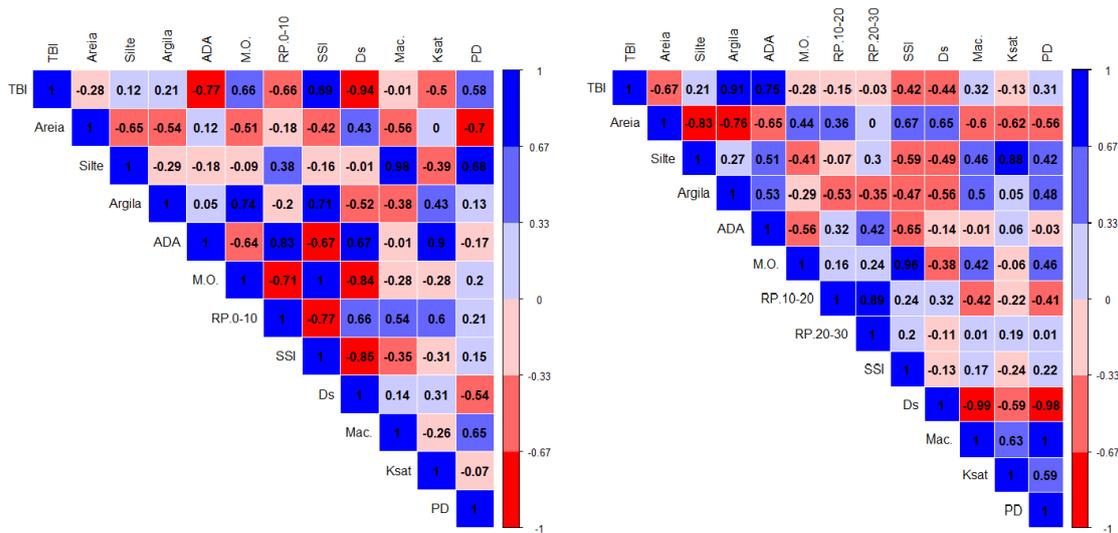
Fonte: Da autora (2023)

Nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm do pousio (Figura 5), houve correlação negativa da TBI com ADA, Ds e RP. Tal comportamento também foi relatado por Araújo et al. (2007), que ainda constataram correlação positiva da TBI com SSI. Ou seja, solos com boa estabilidade estrutural são mais propensos à boa aeração do solo e conseqüentemente melhor infiltração de água.

Na profundidade de 10-20 cm do pousio (Figura 5), observou-se correlação negativa de TBI com Ds, evidenciando que a água encontra maior resistência ao se mover em solo com menos espaços vazios. A Ds também está relacionada inversamente com a porosidade, ou seja, menos espaços vazios entre as partículas, resultando em menor infiltração. A área de pousio

encontrava-se sem cobertura vegetal, sem receber algum tipo de prática conservacionista do solo e exposta à ação da erosão. A Ds se refere à quantidade de massa de solo seco por unidade de volume total de solo, sendo afetada pela cobertura vegetal, teor de matéria orgânica e práticas de uso e manejo do solo (SILVA et al., 2000).

Figura 5 - Correlação de Pearson da profundidade de 0-10 cm do pousio, na bacia hidrográfica estudada, localizada na Universidade Federal de Lavras – UFLA, município de Lavras, em Minas Gerais.



TBI: Taxa básica de infiltração, Areia, Silte, Argila, ADA: Argila dispersa em água, MO: Matéria orgânica, RP 0-10: resistência à penetração na profundidade de 0 a 10 cm, RP 0-20: resistência à penetração na profundidade de 0 a 20 cm, SSI: Índice de estabilidade estrutural, Ds: densidade do solo, Mac: Macroporosidade, Ksat: Condutividade hidráulica saturada, PD: Porosidade drenável.

Fonte: Da autora (2023)

A argila se mostrou presente no grupo da mata de regeneração devido à predominância de solos classificados como Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelhos Amarelos. Na profundidade de 0-10 cm (Figura 6), a Ds é fortemente influenciada pelo uso do solo – nesse caso o pousio, a TBI foi inversamente relacionada com a RP. No entanto, a MO apresentou maior relação com a mata de regeneração, devido ao ciclo contínuo de deposição de resíduos. Ao avaliar diferentes usos do solo – mata e pastagem, Benites et al. (2010) também reportaram maiores valores de MO em áreas de mata de regeneração.

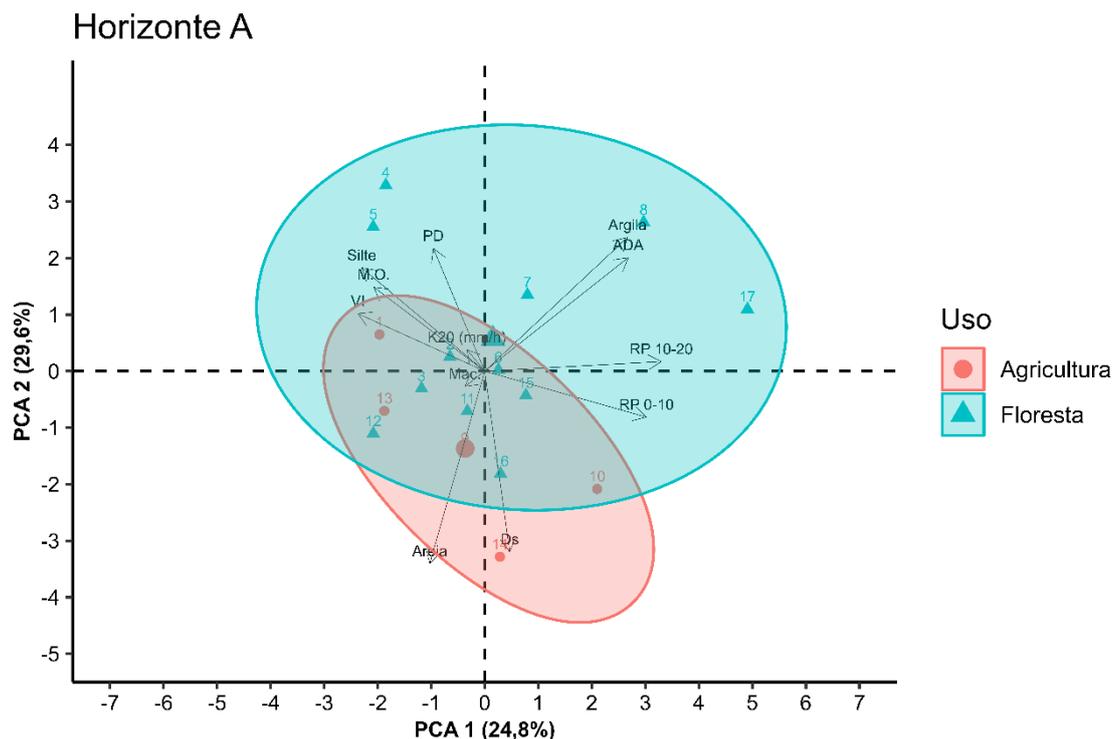


Figura 6: Análise dos componentes principais para os indicadores no horizonte, avaliando o uso do solo. Velocidade de infiltração (VI); Areia; Silte; Argila; Argila dispersa em água (ADA); Matéria orgânica (MO); Resistência à penetração na profundidade 0 a 10 cm (RP 0-10); Resistência à penetração na profundidade 0 a 20 cm (RP 10-20); Índice de estabilidade estrutural (SSI); Densidade do solo (Ds); Macroporosidade (Mac); Condutividade hidráulica saturada (Ksat); Porosidade drenável (PD); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

No horizonte B (Figura 7), notou-se grande variabilidade dos dados da mata de regeneração, por ser um ambiente heterogêneo. A macroporosidade, a porosidade drenável, condutividade hidráulica saturada e MO foram agrupadas na mata de regeneração. São atributos estritamente relacionados com o comportamento hidráulico do solo. A MO influencia a estruturação do solo e a PD é caracterizada como a parcela da porosidade total na qual a água pode se deslocar sem restrições, correspondendo quantitativamente ao teor de ar presente no solo na capacidade de campo (CC) (BELTRAN, 1986; PIZARRO, 1978). Ou seja, representa o volume de poros que permite a drenagem no solo. A Ds foi inversamente proporcional aos atributos macroporosidade, porosidade drenável, condutividade hidráulica saturada e MO. Por se tratar da profundidade de 10-20 cm, sabe-se que normalmente a quantidade de MO é inferior ao teor geralmente encontrado na profundidade 0-10 cm; contudo, este horizonte pode possuir maior teor de argila. Assim, a Ds pode ser influenciada pelos teores de MO, textura e também das características mineralógicas do solo (BRADY; WEIL, 2008). No estudo de Lourente et al. (2011) observou que quanto maior a perda de carbono, maior a Ds, consequentemente podendo ocorrer redução da macroporosidade e da condutividade hidráulica do solo.

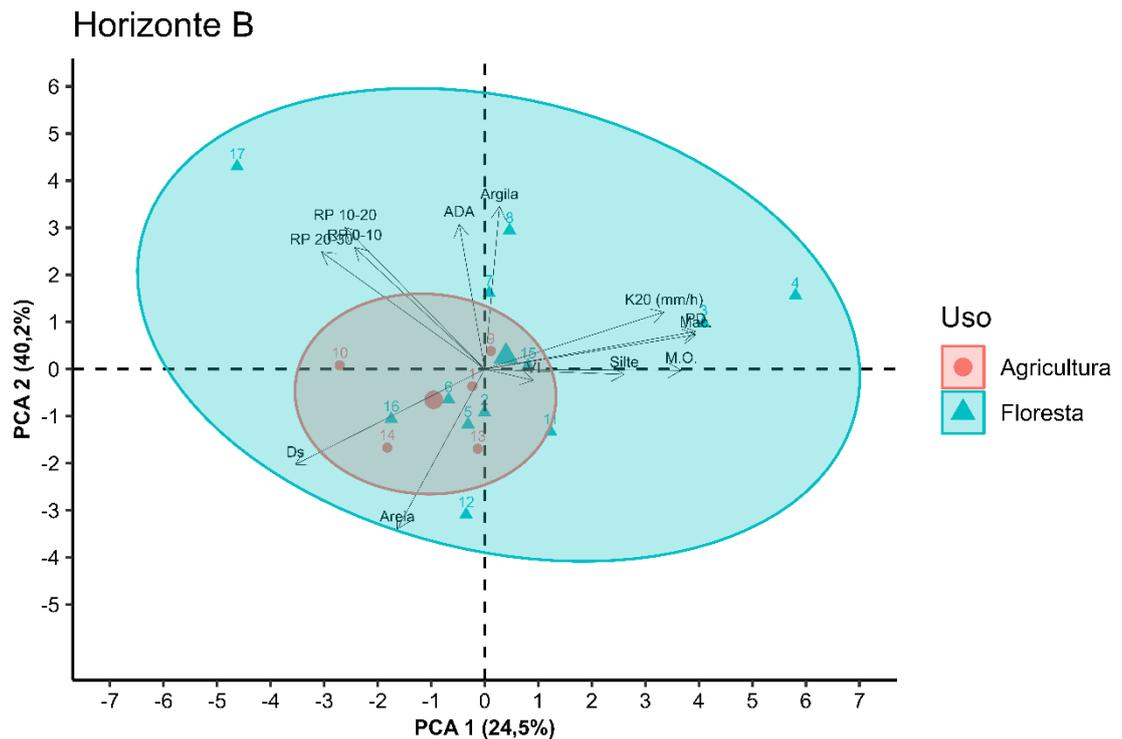


Figura 7: Análise dos componentes principais para os indicadores no horizonte, avaliando o uso do solo. Velocidade de infiltração (VI); Areia; Silte; Argila; Argila dispersa em água (ADA); Matéria orgânica (MO); Resistência à penetração na profundidade 10 a 20 cm (RP 10-20); Resistência à penetração na profundidade 20 a 30 cm (RP 20-30); Índice de estabilidade estrutural (SSI); Densidade do solo (Ds); Macroporosidade (Mac); Condutividade hidráulica saturada (Ksat); Porosidade drenável (PD); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

Ao avaliar o comportamento dos horizontes em cada uso, percebeu-se que o SSI esteve relacionado ao horizonte A. Assim como a MO, comumente encontrada em maiores quantidades no horizonte A, conferindo maior agregação ao solo. Tais resultados são corroborados nos estudos de Santos et al. (2011) ao avaliarem o teor de matéria orgânica na superfície do solo em fragmentos florestais de mata atlântica na APA de Petrópolis-RJ. Foi observado no uso de mata de regeneração (Figura 8), que a argila e RP 10-20 estão relacionados com o horizonte B. Uma das possíveis justificativas é a presença de Argissolos Vermelhos e Argissolos Vermelhos Amarelos. Outra justificativa é que o horizonte B não sofre tantas alterações do manejo como no horizonte A.

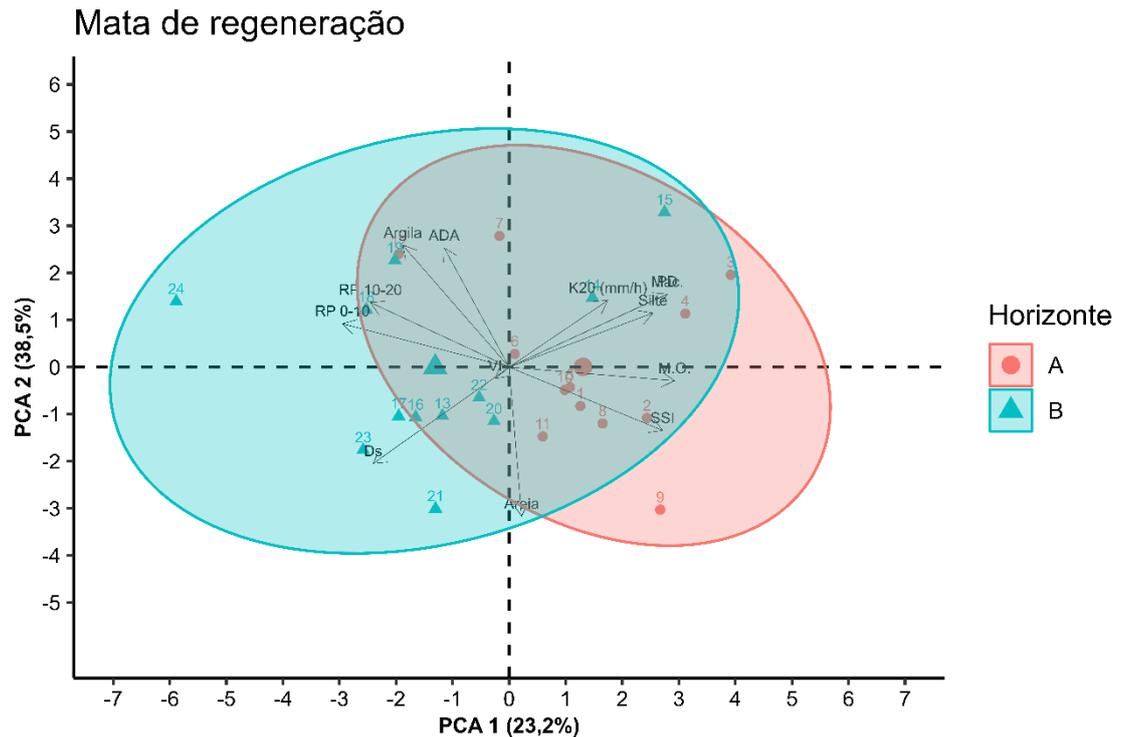


Figura 8: Análise dos componentes principais para os indicadores no uso do solo, avaliando os horizontes. Velocidade de infiltração (VI); Areia; Silte; Argila; Argila dispersa em água (ADA); Matéria orgânica (MO); Resistência à penetração na profundidade 0 a 10 cm (RP 0-10); Resistência à penetração na profundidade 0 a 20 cm (RP 10-20); Índice de estabilidade estrutural (SSI); Densidade do solo (Ds); Macroporosidade (Mac); Condutividade hidráulica saturada (Ksat); Porosidade drenável (PD); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

Na área de pousio (Figura 9), observou-se que a MO, Mac, TBI, PD e SSI foram relacionadas ao horizonte A. No entanto, Ds e RP nas demais profundidades foram relacionadas ao horizonte B.

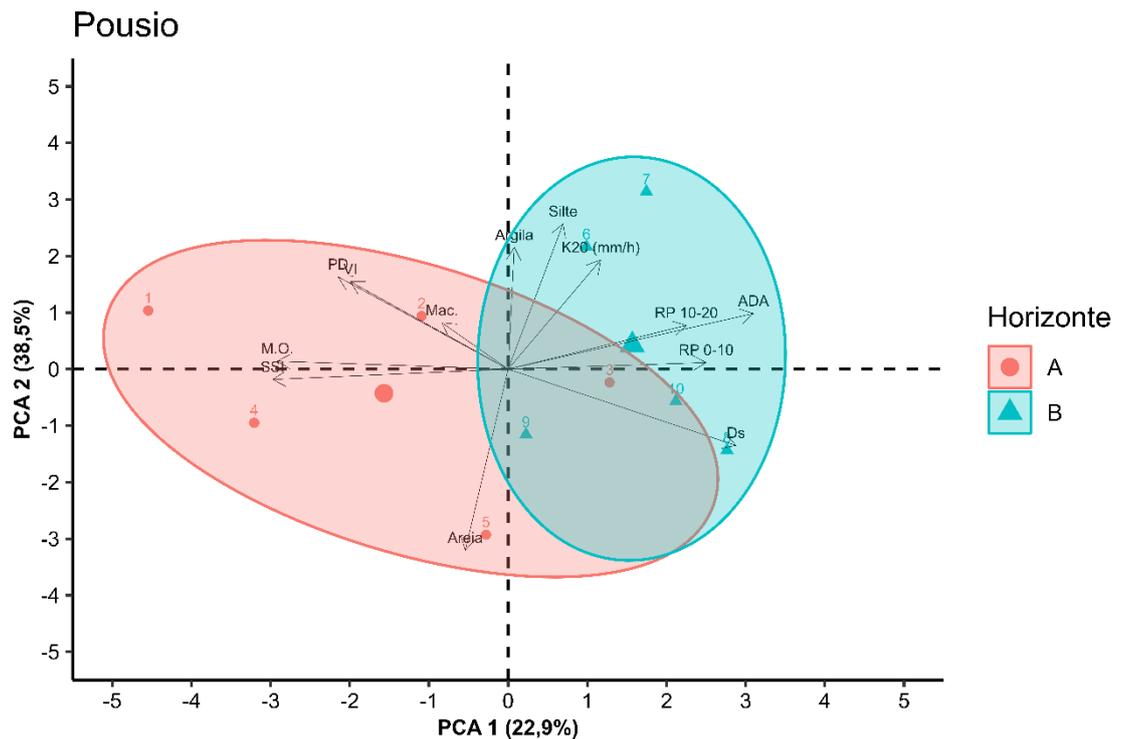


Figura 9: Análise dos componentes principais para os indicadores físicos no uso do solo, avaliando os horizontes. Velocidade de infiltração (VI); Areia; Silte; Argila; Argila dispersa em água (ADA); Matéria orgânica (MO); Resistência à penetração na profundidade 10 a 20 cm (RP 10-20); Resistência à penetração na profundidade 20 a 30 cm (RP 20-30); Índice de estabilidade estrutural (SSI); Densidade do solo (Ds); Macroporosidade (Mac); Condutividade hidráulica saturada (Ksat); Porosidade drenável (PD); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

Ao analisar os IQFS, observou-se que no horizonte A (Figura 10) as funções cresc. de raízes, resistência à erosão e potencial de recarga foram relacionados à mata, ou seja, este ambiente se mostrou mais propício ao crescimento das raízes, às trocas gasosas entre solo e atmosfera e potencial de recarga hídrica. Nos estudos de Araújo et al. (2007) ao avaliarem os IQS em diferentes usos do solo, constataram que a área de vegetação nativa obteve melhores resultados do que a demais áreas avaliadas, sendo elas pastagem natural, floresta de pinus, pastagem plantada e cultivo convencional.

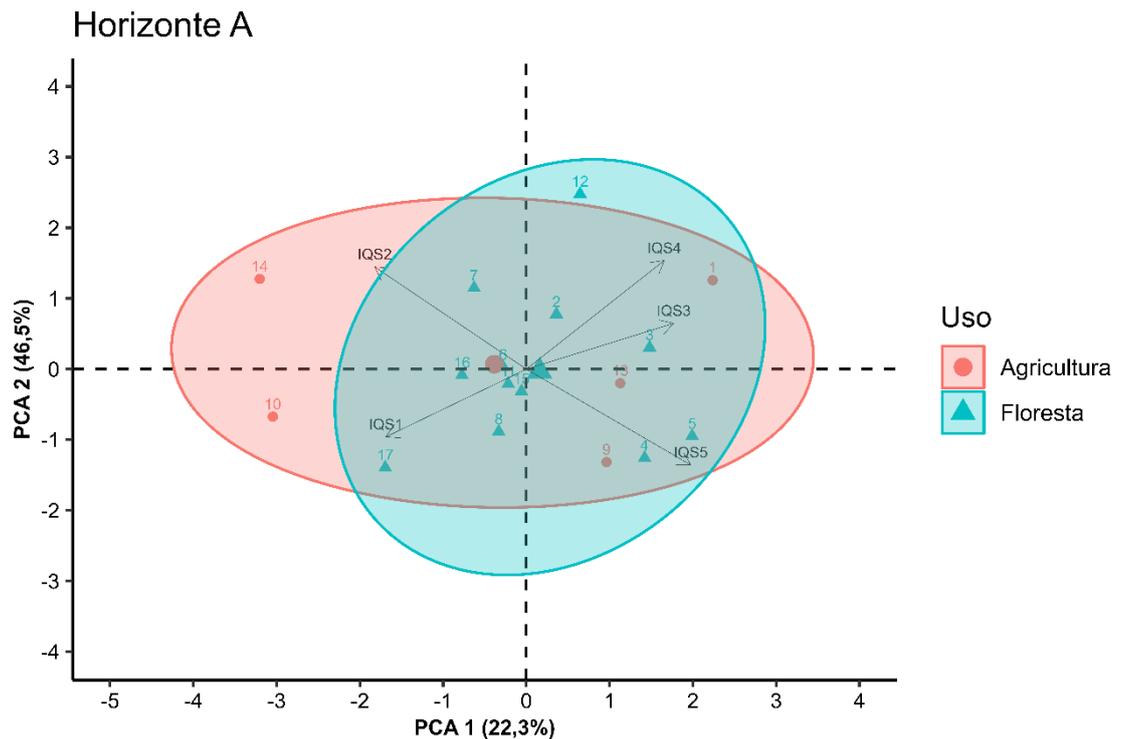


Figura 10: Análise dos componentes principais para os indicadores de qualidade física do solo no horizonte, avaliando o uso do solo. Apoiar o crescimento das raízes (IQS1); Abastecimento de água para as plantas (IQS2); Facilitar trocas gasosas entre solo e atmosfera (IQS3); Resistência à erosão (IQS4); potencial de recarga das águas subterrâneas (IQS5); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

No horizonte B (Figura 11), os índices não se diferenciaram nos ambientes. Ao analisar os IQFS, observou-se que as funções troca gasosas, resist. à erosão e potencial de recarga foram ligadas à mata, ou seja, este ambiente se mostrou mais propício às trocas gasosas entre solo e atmosfera, resistência à erosão e potencial de recarga hídrica. Possivelmente pela presença de MO conforme demonstrado na Figura 7, pois esta melhora a estrutura do solo.

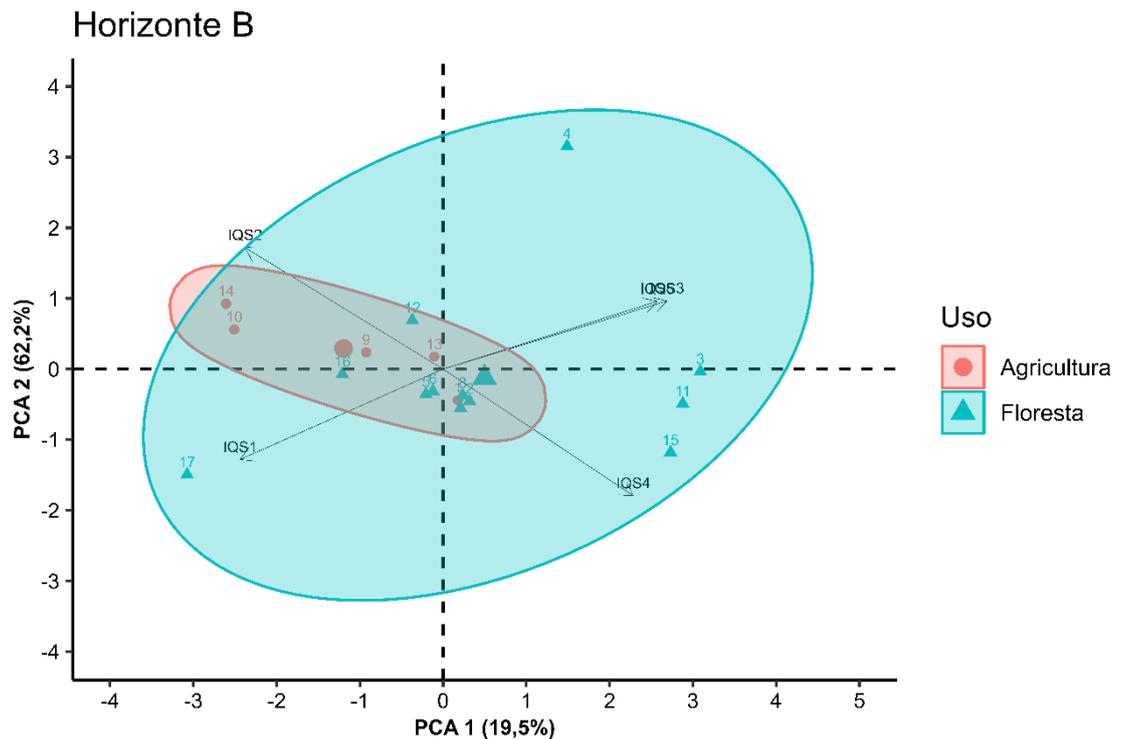


Figura 11: Análise dos componentes principais para os indicadores no horizonte, avaliando o uso do solo. Apoiar o crescimento das raízes (IQS1); Abastecimento de água para as plantas (IQS2); Facilitar trocas gasosas entre solo e atmosfera (IQS3); Resistência à erosão (IQS4); potencial de recarga das águas subterrâneas (IQS5); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

Ao analisar por ambiente, em ambos os usos (Figura 12 e 13), observou-se que os IQS 3, 4 e 5 foram relacionadas ao horizonte A, ou seja, a facilitação de trocas gasosas entre solo e atmosfera, resistência à erosão e potencial de recarga das águas subterrâneas. O horizonte A geralmente possui maior porosidade devido à presença de matéria orgânica e raízes. Isso favorece a difusão de gases, como oxigênio e dióxido de carbono, entre o solo e a atmosfera. Além disso, este horizonte apresentou maior teor de MO o que conferiu maior resistência à erosão e melhor infiltração de água.

Ao analisar o abastecimento de água para as plantas – IQS 2, não foi encontrada diferenciação entre os ambientes estudados.

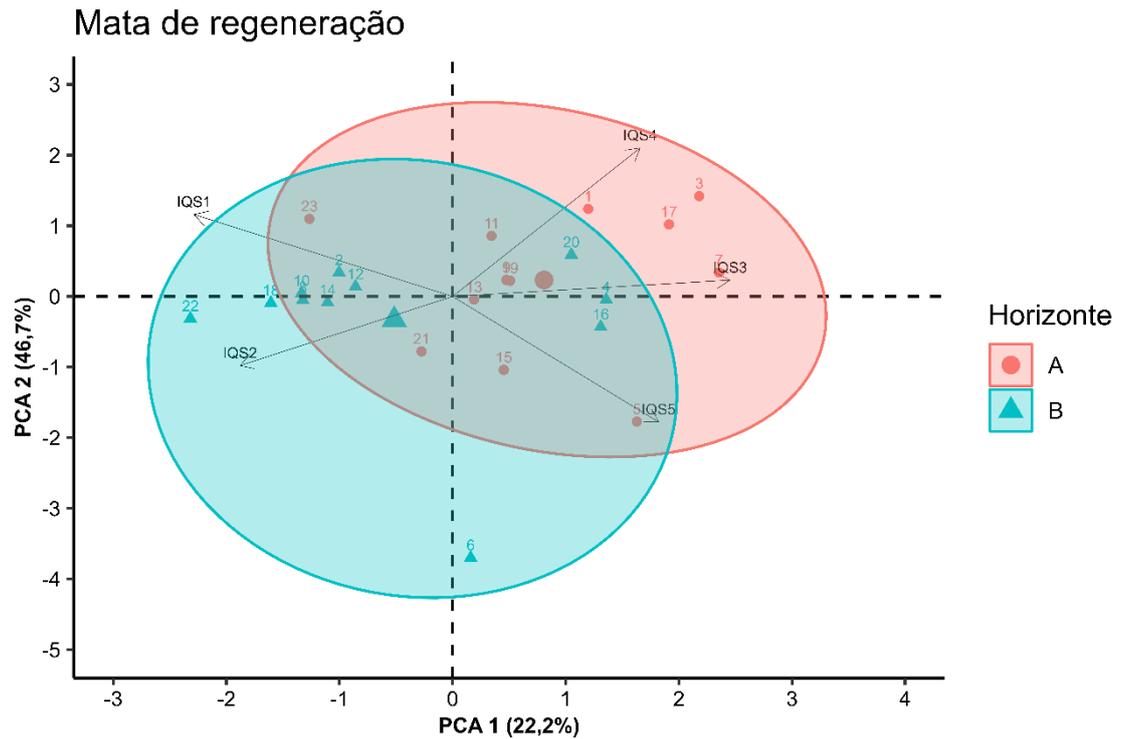


Figura 12: Análise dos componentes principais para os indicadores de qualidade física do solo no uso do solo, avaliando os horizontes. Apoiar o crescimento das raízes (IQS1); Abastecimento de água para as plantas (IQS2); Facilitar trocas gasosas entre solo e atmosfera (IQS3); Resistência à erosão (IQS4); potencial de recarga das águas subterrâneas (IQS5); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

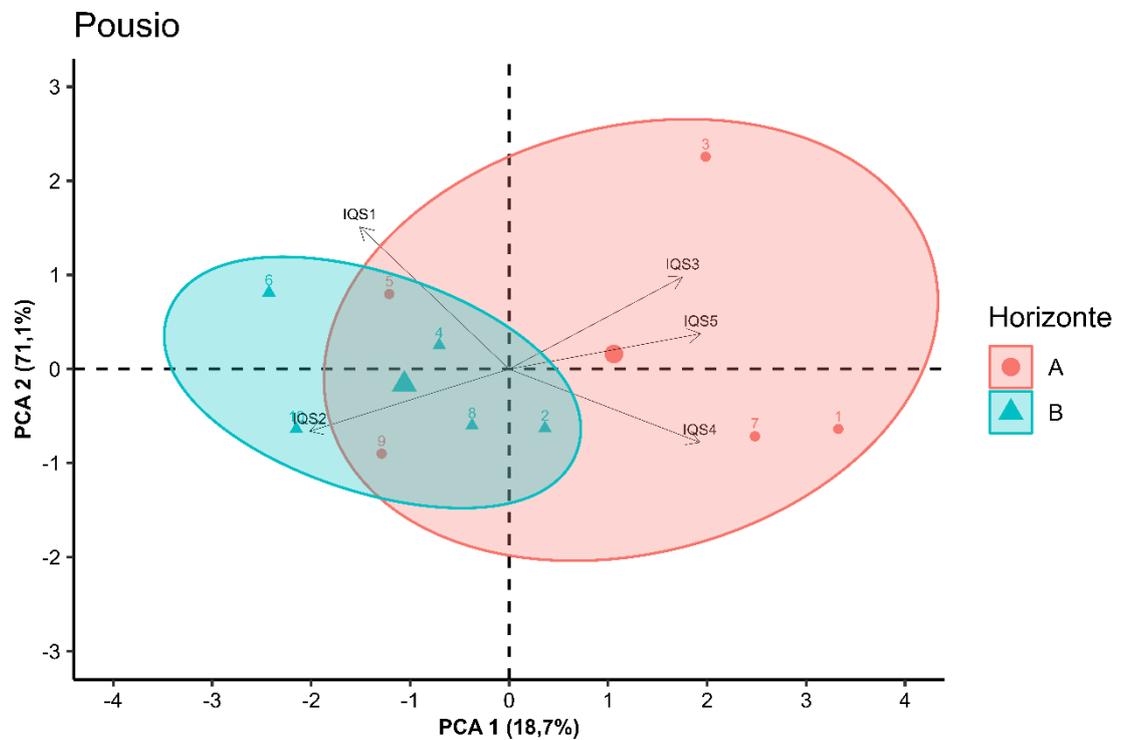


Figura 13: Análise dos componentes principais para os indicadores de qualidade física do solo no uso do solo, avaliando os horizontes. Apoiar o crescimento das raízes (IQS1); Abastecimento de água para as plantas (IQS2); Facilitar trocas gasosas entre solo e atmosfera (IQS3); Resistência à erosão (IQS4);

potencial de recarga das águas subterrâneas (IQS5); componente principal 1 (PCA1); e componente principal 2 (PCA2).

3.1 Espacialização dos Índices de qualidade física do solo

Por meio da Figura 14, observou-se que na profundidade de 0-10 cm, assim como na profundidade 10-20 cm, as regiões destacadas pelas setas apresentaram a função de apoiar o crescimento das raízes, com valores em torno de, com valores no entorno de 0,12 e 0,15 respectivamente. Tal função está relacionada com a função de abastecimento de água para as plantas (Figura 15) que destaca áreas similares, no uso de pousio, conforme destacado pela seta. As classes de solos nesses locais são Argissolo Vermelho e Latossolo vermelho (Figura 2), o que favorece a infiltração de água no solo, visto que sua estrutura é do tipo granular. Isso também pode ter ocorrido devido ao papel que as raízes desempenham na absorção de água do solo (FREITAS; BARROSO; CARNEIRO, 2008). Quando uma planta está se desenvolvendo, as raízes são responsáveis por buscar água e nutrientes no solo, desempenhando um papel fundamental no abastecimento hídrico e nutricional da planta (BATISTA et al., 2018). Se o solo oferece condições adequadas para o crescimento saudável das raízes, estas se expandem e absorvem água de maneira eficiente (BRADY; WEIL, 2012). Apesar de ser uma área de pousio, havia um trecho com plantio de pitaias, o que pode ter favorecido melhor desempenho dessa função no local.

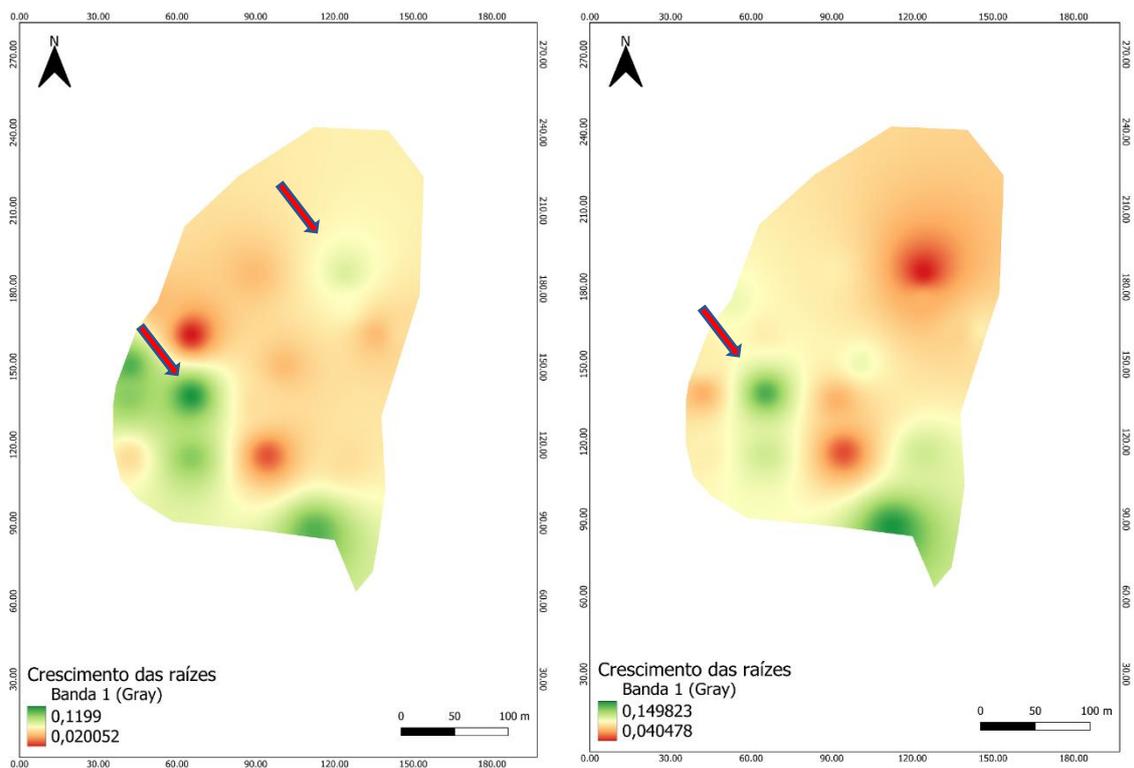


Figura 14: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligado ao crescimento das raízes profundidade 0-10 (à esquerda) e profundidade 10-20 (à direita), respectivamente.

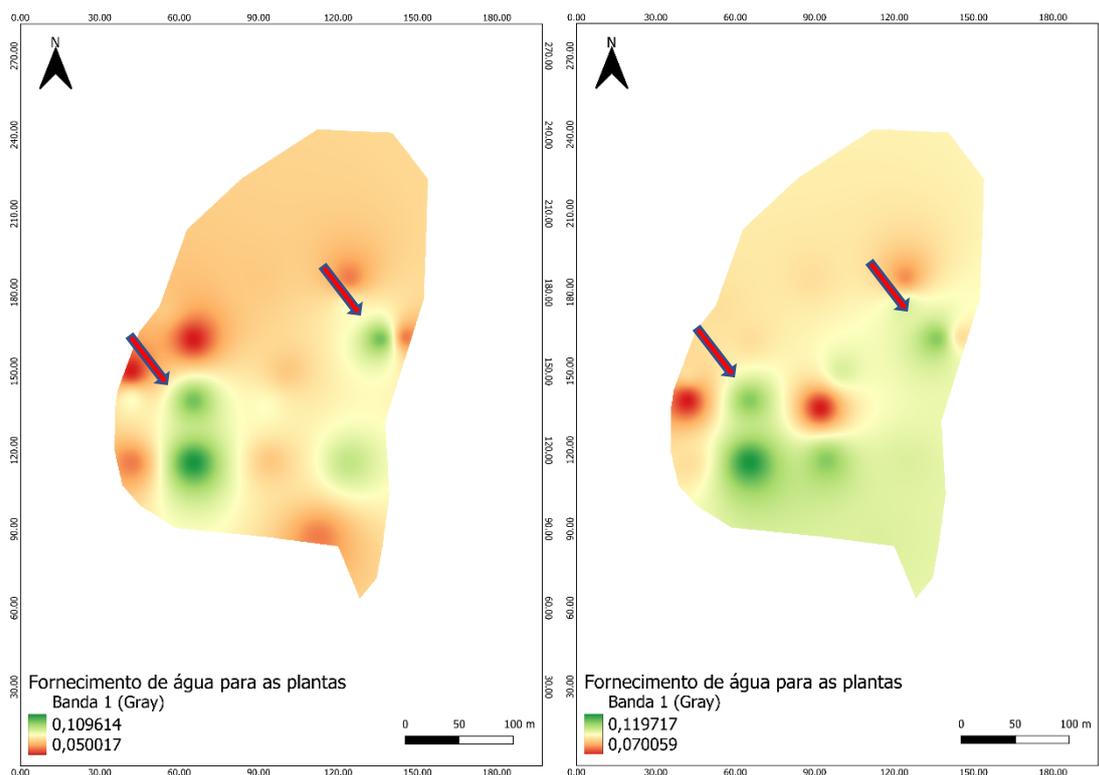


Figura 15: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligado ao abastecimento de água para as plantas na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

A Figura 16, demonstra que a função de facilitar trocar gasosas entre solo e atmosfera esteve relacionada com a área correspondente à mata de regeneração (Figura 3). Possivelmente nessa área houve maior contribuição de MO, conforme pode ser observado na análise de componentes principais (Figura 7). Deste modo, essa região apresentou melhor estrutura, com proporções adequadas de poros, e melhor estabilidade dos agregados, assim como aprimoramento dos atributos físico-hídricos (CAMPOS et al., 1995; MENEZES., et al 2009).

A resistência do solo à erosão (Figura 17) apresentou maiores valores, 0,13 (profundidade 0-10 cm) e 0,06 (profundidade 10-20 cm) nas áreas da microbacia de maior elevação (Figura 23), em torno de 915 metros. Tendo em comum com o estoque de carbono (Figura 22), localizada dentro do uso de mata de regeneração, conforme o ponto destacado pela seta. A presença de cobertura do solo de mata de regeneração minimizou os impactos potenciais da declividade (Figura 23), tornando o solo menos exposto à erosão (MENEZES et al., 2009). O carbono orgânico ajuda a criar uma rede de partículas agregadas, reduzindo a probabilidade de desagregação do solo sob a ação da água ou do vento (BALIN et al., 2017). Além de poder aumentar a capacidade de retenção de água do solo, reduzindo o impacto das chuvas intensas na erosão.

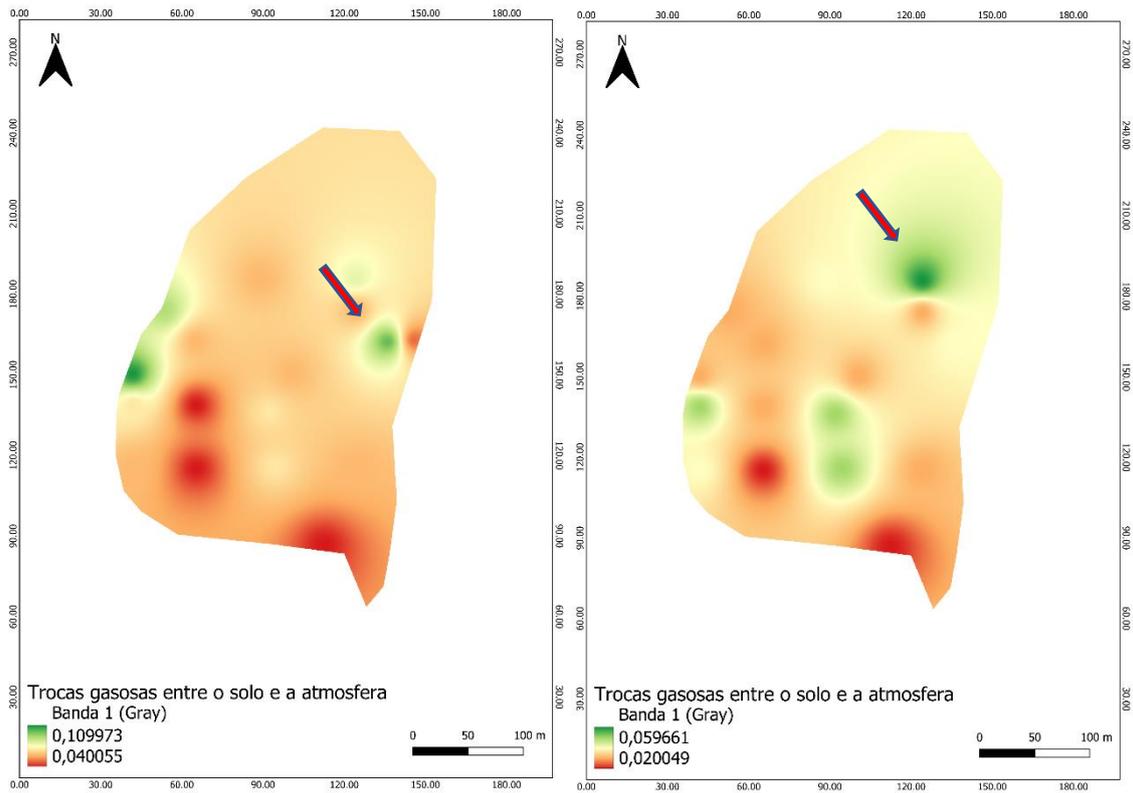


Figura 16: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligada à facilitação de trocas gasosas entre solo e atmosfera na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

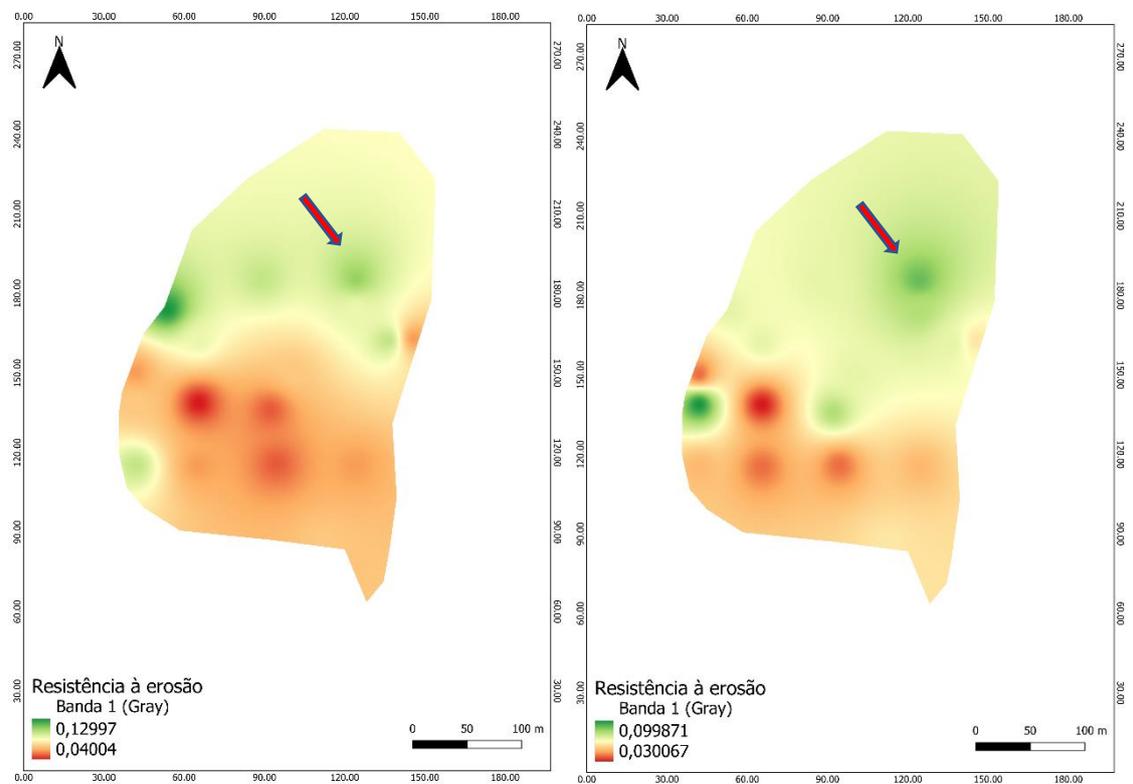


Figura 17: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligada à resistência à erosão na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

A Figura 28 demonstra que no geral, a microbacia apresentou poucos locais com alto potencial de recarga. Observou-se o maior potencial de recarga nas porções com maior elevação da área de estudo, com mais de 915 m de elevação. A mesma região da bacia hidrográfica favoreceu vários serviços ecossistêmicos, conforme apontado pela seta (profundidade 0-10), citando facilitação das trocas gasosas entre solo e atmosfera (0,11), abastecimento de água para as plantas (0,11), resistência à erosão (0,13) e potencial de recarga das águas subterrâneas (0,18), gerando nessa localidade um IQPS de 0,46. Nesta região ainda apresentou VI de 35,30 mm h^{-1} , espessura do horizonte A de 13 cm (valor médio) e estoque de carbono de 61,28 t ha^{-1} , que são atributos diretamente relacionados com os processos de infiltração de água no solo. Destaca-se que esse ponto se encontrava dentro da mata de regeneração, mostrando a importância dos ambientes conservados no fornecimento dos serviços ecossistêmicos. Nos estudos de Araújo et al., (2007) ao compararem os índices de qualidade do solo, os autores observaram que houve influência do uso do solo, corroborando com os resultados apresentados neste trabalho. Além disso a classe de solo nesse ponto é o Latossolo Vermelho, que normalmente são solos profundos, bem drenados e estrutura granular.

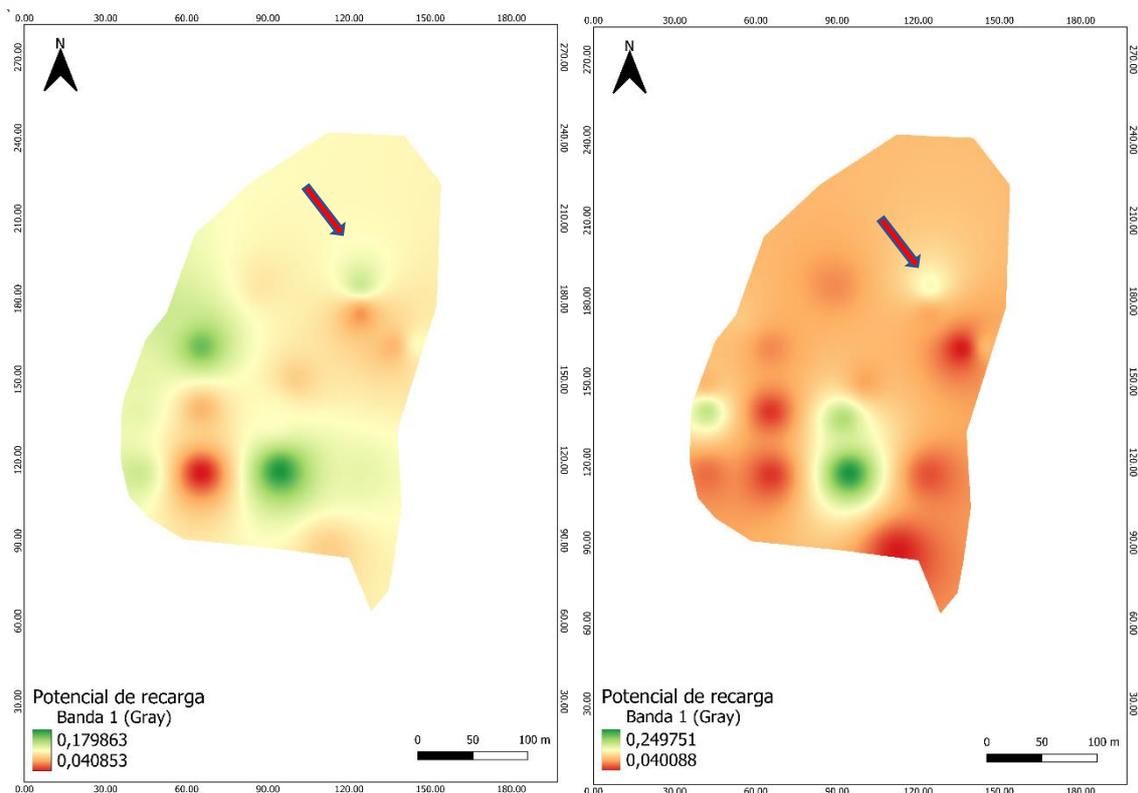


Figura 18: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligado ao potencial de recarga das águas subterrâneas na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

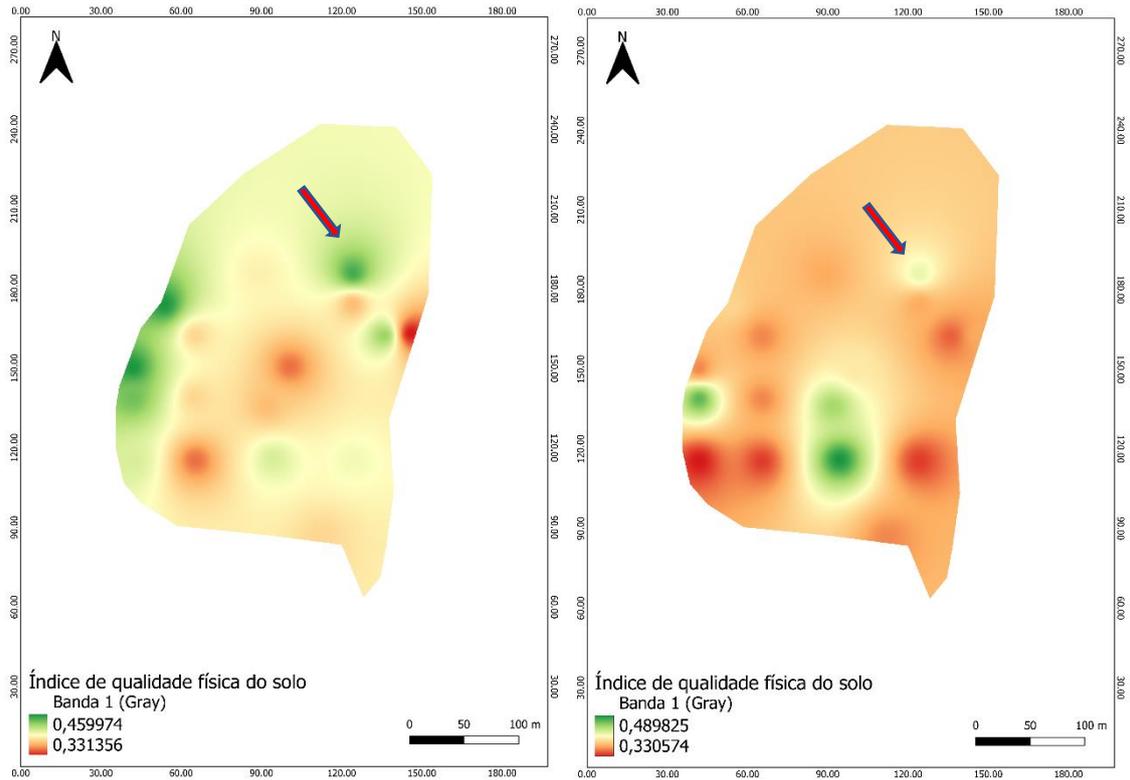


Figura 19: Índice de qualidade física do solo na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

Espacialização dos mapas de validação

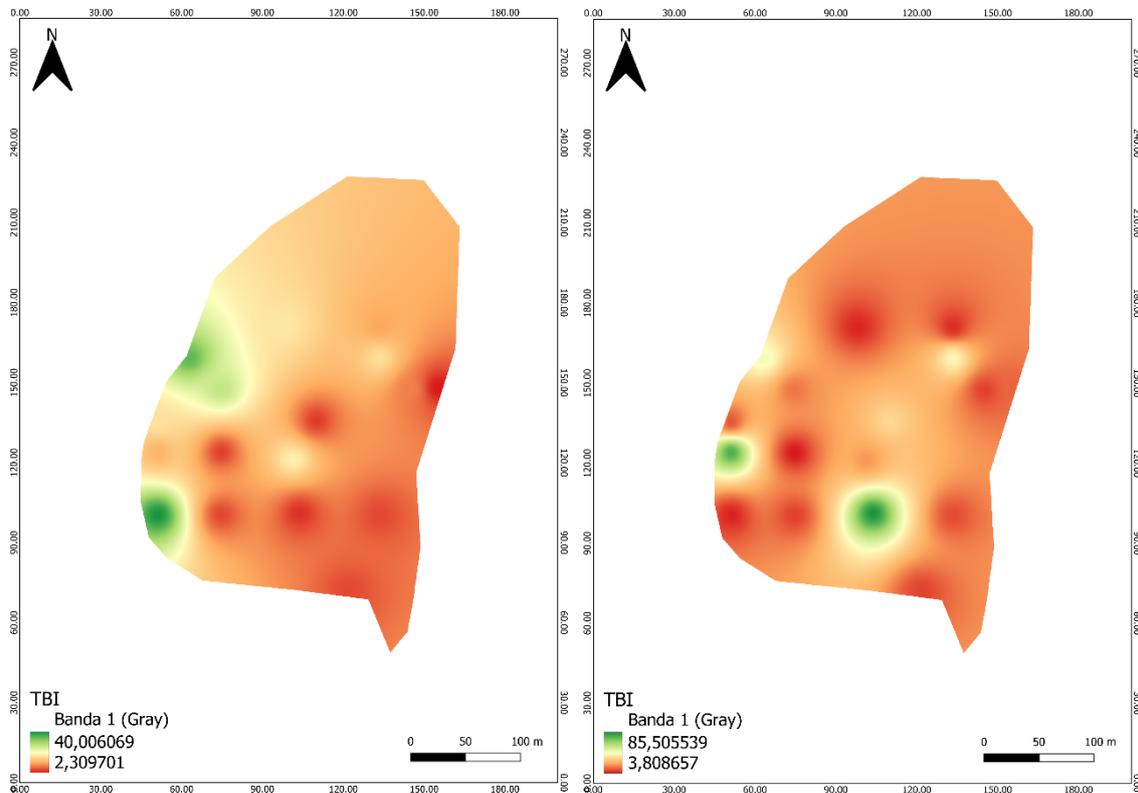


Figura 20: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligado à taxa básica de infiltração na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

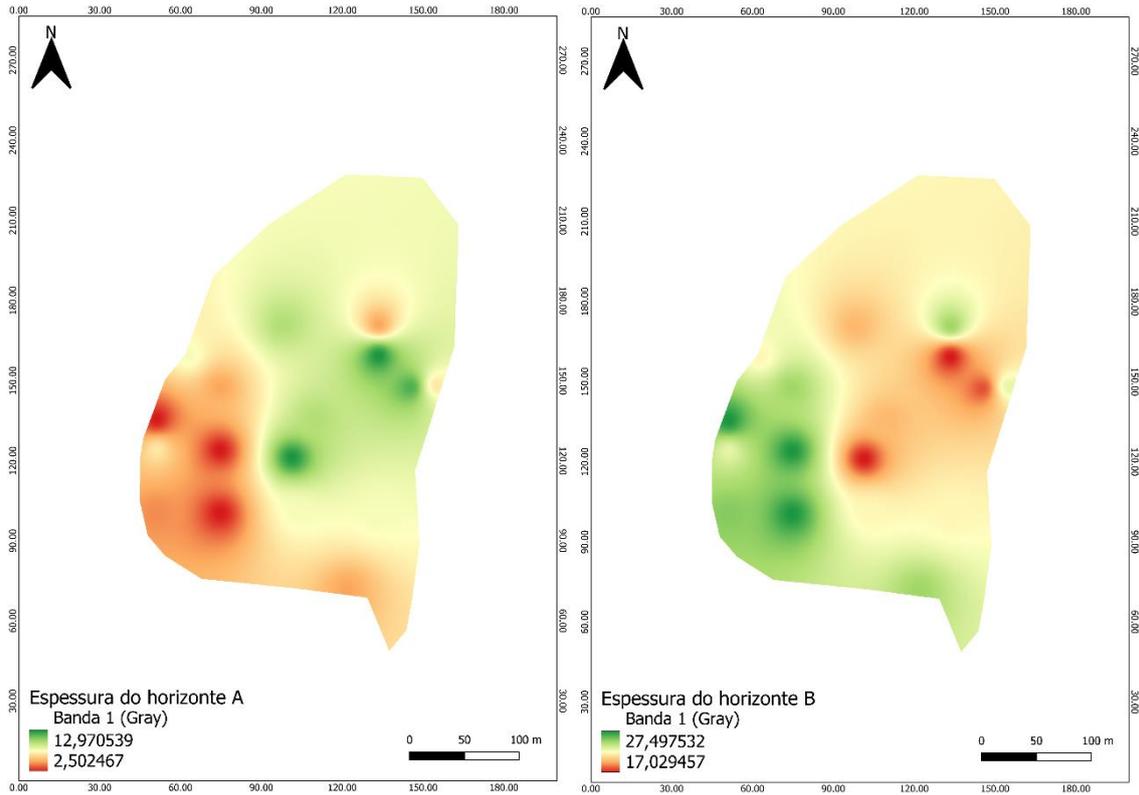


Figura 21: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligado à espessura do horizonte Horizonte A e Horizonte B, respectivamente.

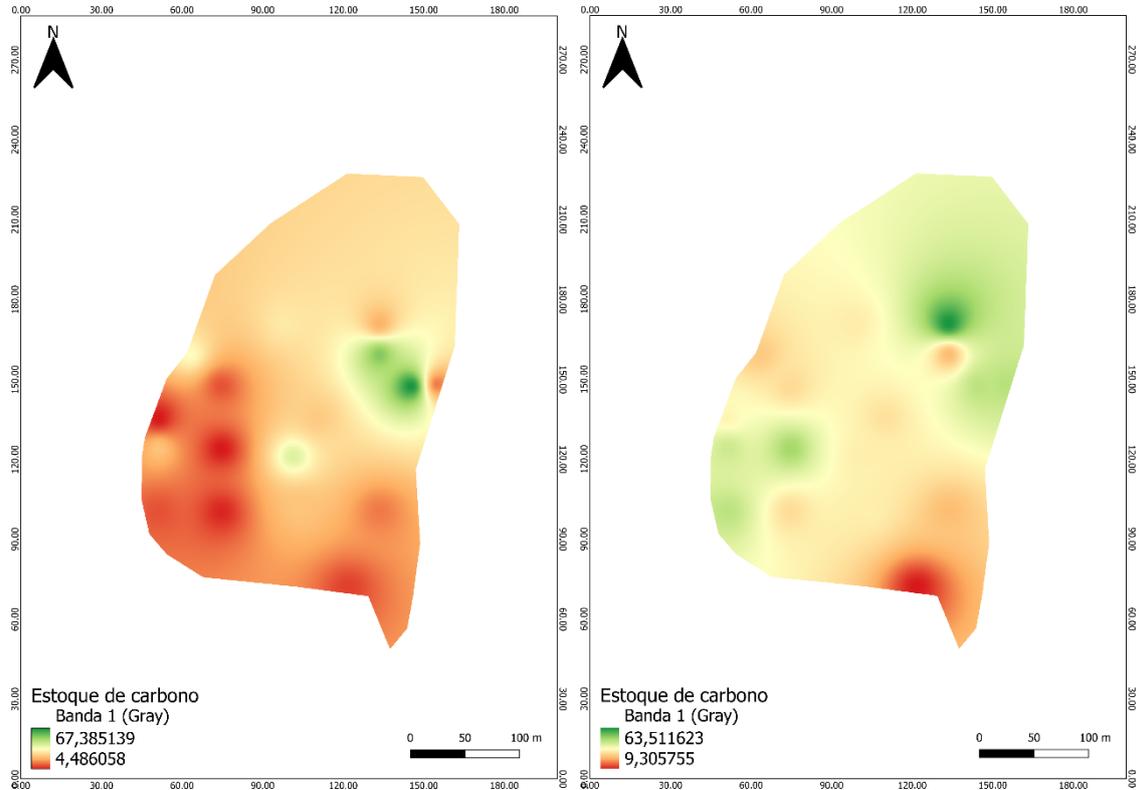


Figura 22: Variabilidade espacial do índice de qualidade física do solo ligado ao estoque de Carbono na profundidade 0-10 cm e profundidade 10-20 cm, respectivamente.

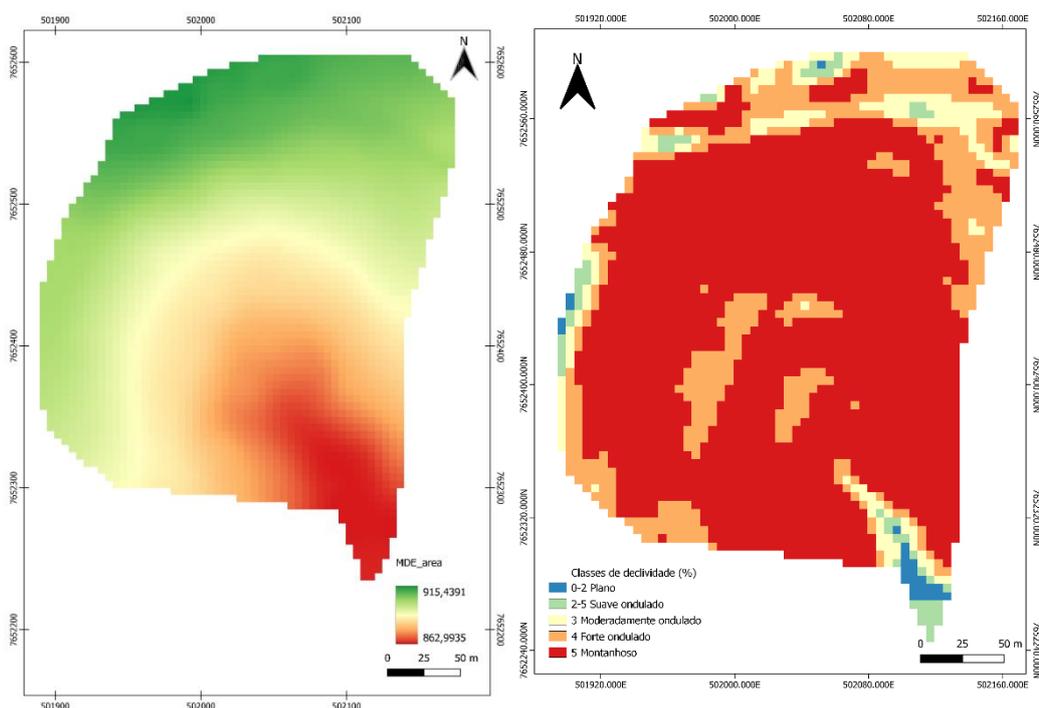


Figura 23: Modelo digital de elevação (à esquerda) e declividade (à direita) da bacia hidrográfica de estudo.

4 CONCLUSÕES

Os resultados apontaram que a profundidade 0-10 cm apresentou os maiores valores dos índices relacionados à facilitação das trocas gasosas entre solo e atmosfera, abastecimento de água para as plantas, resistência à erosão, potencial de recarga das águas subterrâneas, índices de qualidade física do solo geral e velocidade de infiltração. Nesse contexto, destacou-se uma região comum da bacia hidrográfica – área de mata de regeneração, onde a classe de solo é o Latossolo Vermelho, apresentando maior estoque de carbono e maior potencial de recarga.

A mata em processo de regeneração apresentou grande importância para garantir diversos serviços ecossistêmicos, indicando a necessidade de implementação de estratégias nos demais usos da bacia com o objetivo de melhorar o fornecimento dos serviços ecossistêmicos ou alcançar no mínimo o mesmo nível de qualidade física do solo identificado.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA JÚNIOR, M. C. D. de et al. Taxa de infiltração de água no solo em diferentes usos do solo. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 8, n. 2, p. 115–121, 26 jun. 2020. doi: 10.20873/jbb.uft.cemaf.v8n2.almeida.

ALVARENGA, C. C. et al. Índice de qualidade do solo associado à recarga de água subterrânea (IQS RA) na Bacia Hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de**

Ciência do Solo, v. 36, n. 5, p. 1608–1619, nov. 2012. doi: 10.1590/S0100-06832012000500025.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ARAÚJO, R. et al. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1099–1108, out. 2007. doi: 10.1590/S0100-06832007000500025.

BALIN, N. M. et al. Frações da matéria orgânica, índice de manejo do carbono e atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Scientia agraria**, v. 18, n. 3, p. 85-94, 2017.

BARBOSA, L. C. et al. Soil physical quality associated with tillage practices during sugarcane planting in south-central Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 195, p. 104383, dez. 2019. doi: 10.1016/j.still.2019.104383.

BATISTA, M. A. et al. **Princípios de fertilidade do solo, adubação e nutrição mineral**. In: BRANDÃO FILHO, J.U.T., FREITAS, P.S.L., BERIAN, L.O.S., and GOTO, R., comps. Hortaliças-fruto [online]. Maringá: EDUEM, pp. 113-162. ISBN: 978-65-86383-01-0, 2018. doi.org/10.7476/9786586383010.0006.

BEDBABIS, S. et al. Effect of irrigation with treated wastewater on soil chemical properties and infiltration rate. **Journal of Environmental Management**, v. 133, p. 45–50, jan. 2014. doi: 10.1016/j.jenvman.2013.11.007.

BELTRAN, J. M. **Drenaje agrícola**. Madrid: Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario, 1986. 239 p

BENITES, V. de M. et al. Análise discriminante de solos sob diferentes usos em área de Mata Atlântica a partir de atributos da matéria orgânica. **Revista Árvore**, v. 34, n. 4, p. 685–690, ago. 2010. doi: 10.1590/S0100-67622010000400013.

BOCHNER, J. K. et al. Matéria orgânica e agregação de um planossolo sob diferentes coberturas florestais. **Cerne**, v. 14, n. 1, p. 46-53, 2008.

BOWLES, J. A. Engineering properties of soils and their measurements. Third edition. **McGraw-Hill Book Company**, NY, 1986.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 685 p.

CALZOLARI, C. et al. A methodological framework to assess the multiple contributions of soils to ecosystem services delivery at regional scale. **Geoderma**, v. 261, p. 190–203, jan. 2016. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.07.013.

CAMPOS, B.C. et al. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, n.1, p.121-126, 1995.

CÂNDIDO, B. M. et al. Métodos De Indexação De Indicadores Na Avaliação Da Qualidade Do Solo Em Relação À Erosão Hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 589–597, abr. 2015. doi: 10.1590/01000683rbc20140363.

CARDOSO, E. J. B. N. et al. Soil health: looking for suitable indicators. What should be considered to assess the effects of use and management on soil health? **Scientia Agricola**, v. 70, n. 4, p. 274–289, ago. 2013. doi: 10.1590/S0103-90162013000400009.

CARSEL, R. F.; PARRISH, R. S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. **Water resources research**, v. 24, n. 5, p. 755-769, 1988.

CHERUBIN, M. R. et al. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. **Plos One**, v. 11, n. 3, p. e0150860, 3 mar. 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0150860.

CONRAD, O. et al (2015): **System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA)** v. 9.2.0, *Geoscientific Model Development*, 8, 1991-2007, doi:10.5194/gmd-8-1991-2015.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendências climáticas em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 31, p. 1862-1866, 2007.

EMPRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2a . ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 306p. 2006.

FREITAS, T. A. S. de; BARROSO, D. G.; CARNEIRO, J. G. de A. Dinâmica de raízes de espécies arbóreas: visão da literatura. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 1, p. 133–142, 30 mar. 2008. doi: 10.5902/19805098518.

FRIENDLY M. *Corrgrams: Exploratory displays for correlation matrices*. The American Statistician, 56, 316–324, 2002.

GRIMALDI, M. et al. Ecosystem services of regulation and support in Amazonian pioneer fronts: searching for landscape drivers. **Landscape Ecology**, v. 29, n. 2, p. 311–328, 12 fev. 2014. doi: 10.1007/s10980-013-9981-y.

KARLEN, D. L. et al. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. **Soil and Tillage Research**, v. 31, n. 2–3, p. 149–167, ago. 1994. doi: 10.1016/0167-1987(94)90077-9.

KARLEN, D. L. et al. A soil quality framework for evaluating the impact of CRP. **Journal of Production Agriculture**, 11:56-60, 1998.

LOURENTE, P. R. E. et al. Atributos Microbiológicos, Químicos E Físicos De Solo Sob Diferentes Sistemas De Manejo E Condições De Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, 19 jan. 2011. doi: 10.5216/pat.v41i1.8459.

MENEZES, M. D. et al . Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha - Serra da Mantiqueira (MG). **Scientia Forestalis (IPEF)** v. 37, p. 175-184, 2009.

PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKI, A. & KAUS, A. Critical soil bulk density and strength for pea seedling root growth as related to other soil factors. **Soil Till. Res.**, 46:203-208, 1998.

PASSINATO, J. H.; AMADO, T. J. C.; KASSAM, A.; ACOSTA, J. A. A.; AMARAL, L. de P. Soil Health Check-Up of Conservation Agriculture Farming Systems in Brazil. **Agronomy**, v. 11, n. 12, p. 2410, 26 nov. 2021. doi: 10.3390/agronomy11122410.

PRADO, R. B. et al. Oportunidades e desafios relacionados aos serviços ecossistêmicos de solo e água na paisagem rural. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 39, n. 2, p. 26955, 27 set. 2022. doi: 10.35977/0104-1096.cct2022.v39.26955.

PIZARRO, F. **Drenaje agrícola y recuperacion de suelos salinos**. Madrid, Editorial Agrícola España, 1978, 521p.

QGIS Development Team. (2023). **QGIS** Geographic Information System (versão 3.28). Open Source Geospatial Foundation Project. Disponível em: <https://qgis.org>. Acesso em: 20 de dezembro de 2023.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2024.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manole, 1987. 188p.

REYNOLDS, W. D. et al. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v. 152, n. 3–4, p. 252–263, set. 2009. doi: 10.1016/j.geoderma.2009.06.009.

REYNOLDS, W. D. et al. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. **Geoderma**, v. 146, n. 3–4, p. 466–474, ago. 2008. doi: 10.1016/j.geoderma.2008.06.017.

RINOT, O. et al. Soil health assessment: A critical review of current methodologies and a proposed new approach. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 1484-1491, 2019.

RODRIGUEZ, L. et al. Agroforestry systems in the Colombian Amazon improve the provision of soil ecosystem services. **Applied Soil Ecology**, v. 164, p. 103933, ago. 2021. doi: 10.1016/j.apsoil.2021.103933.

SAFAEI, M. et al. Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. **Catena**, v. 177, p. 260–271, jun. 2019. doi: 10.1016/j.catena.2019.02.021.

SANTANA, M. L. T. et al. Interactions between land use and soil type drive soil functions, highlighting water recharge potential, in the Cantareira System, Southeast of Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 903, p. 166125, dez. 2023. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166125.

SANTOS, B. do C. et al. Estoque de Matéria Orgânica na Superfície do Solo em Fragmentos Florestais de Mata Atlântica na APA de Petrópolis-RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 18, n. 3, p. 266–274, 3 jul. 2011. doi: 10.4322/floram.2011.047. Acesso em: 17 dez. 2023.

SANTOS, W. P. et al. Soil quality assessment using erosion-sensitive indices and fuzzy membership under different cropping systems on a Ferralsol in Brazil. **Geoderma Regional**, v. 25, p. e00385, 2021.

SILVA, A. S. et al. Propriedades físicas e químicas em diferentes usos do solo no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 1064–1072, ago. 2013. doi: 10.1590/S0100-06832013000400023.

SOARES, F. S; FRANCISCO, C. N; SENNA, M. C. A. Distribuição espaço-temporal da precipitação na Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande-RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 125-138, 2014.

SOUZA, Z. M. de; ALVES, M. C. Movimento de água e resistência à penetração em um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado, sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 18–23, abr. 2003. doi: 10.1590/S1415-43662003000100004.

STANCATI, G.; NOGUEIRA, J. B. E VILAR, O. M. **Ensaio de laboratório em mecânica dos solos**. USP. Escola de Engenharia de São Carlos, p. 208, 1981.

STEFANOSKI, D. C. et al. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, v. 17, p. 1301-1309, 2013.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. **Revista brasileira de ciência do solo**, v. 15, n. 3, p. 229-235, 1991.

STOLF, R. et al. Penetrômetro de impacto Stolf - programa computacional de dados em EXCEL-VBA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 774-782, 2014.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de métodos de análise de solo**. 2017.

VAN GENUCHTEN, M. Th. A Closed-Form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil science society of America journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

VAZ, C. M. P. et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. **Geoderma**, v. 166, n. 1, p. 92–101, out. 2011. doi: 10.1016/j.geoderma.2011.07.016.

WHITE, R. E. **Princípios e Prática da Ciência do Solo: O Solo como Recurso Natural**. Pub Blackwell., 2006.

ZHANG, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 1024-1030, 1997.

ZILLI, M. T. et al. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2 abr. 2017. doi: 10.1002/joc.4840.