

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS INSTITUTO DE
EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DO SOLO
EM ÁREAS DE FLORESTA E CAMPOS NATURAIS NO
PARQUE NACIONAL DO MAPINGUARI NO SUL DO
AMAZONAS**

ALINE SANTOS DIAS

**ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS
COORIENTADOR: DR. JHONATAN RAFAEL ZÁRATE SALAZAR**

**Humaitá, AM
Julho/2025**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS INSTITUTO DE
EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS DO
SOLO EM ÁREAS DE FLORESTA E CAMPOS NATURAIS
NO PARQUE NACIONAL DO MAPINGUARI NO SUL DO
AMAZONAS**

ALINE SANTOS DIAS

*Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais da
Universidade Federal do
Amazonas, como parte dos
requisitos para obtenção do título
de Mestre Ciências Ambientais.*

**O ORIENTADOR: PROF. DR. MILTON CÉSAR COSTA CAMPOS
COORDENADOR: DR. JHONATAN RAFAEL ZÁRATE SALAZAR**

**Humaitá, AM
Julho/2025**

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

D541a Dias , Aline Santos

Avaliação dos serviços ecossistêmicos do solo em áreas de floresta e campos naturais no Parque Nacional do Mapinguari, no sul do Amazonas / Aline Santos Dias . - 2025.

50 f. : il., color. ; 31 cm.

Orientador(a): Milton César Costa Campos.

Coorientador(a): Jhonatan Rafael Zárate Salazar.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Humaitá-AM, 2025.

1. Amazônia. 2. Sustentabilidade. 3. Unidades de conservação. 4. Ecossistema. 5. Solo. I. Campos, Milton César Costa. II. Salazar, Jhonatan Rafael Zárate. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. IV. Título

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
INSTITUTO DE EDUCAÇÃO, AGRICULTURA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
AMBIENTAIS

FOLHA DE APROVAÇÃO

TÍTULO: AVALIAÇÃO DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DO SOLO EM ÁREAS DE FLORESTA E CAMPOS NATURAIS NO PARQUE NACIONAL DO MAPINGUARI NO SUL DO AMAZONAS.


(Linha de Pesquisa 2: Sociedade, Biodiversidade e Sustentabilidade do bioma amazônico)

ALINE SANTOS DIAS


Disser Dissertação defendida e aprovada em 01 de julho de 2025, pela comissão julgadora:

M Campos

Orientador: Prof. Dr. Milton César Costa Campos
Orientador PPGCA/ IEAA/ UFAM

Documento assinado digitalmente
 **BENONE OTAVIO SOUZA DE OLIVEIRA**
Data: 20/10/2025 15:21:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pf. Dr. Benoni Otavio Souza de Oliveira
Examinado(a) Interno PPGCA/ IEAA/ UFAM

Documento assinado digitalmente
 **TANCREDO AUGUSTO FEITOSA DE SOUZA**
Data: 20/10/2025 15:08:50-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tancredo Augusto Feitosa de Souza
Examinador(a): Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA-UFAM) pela oportunidade em cursar esse mestrado. À Fundação de Amparo à Pesquisa do Amazonas (FAPEAM) pelo apoio financeiro durante a realização da pesquisa.

Aos meus orientadores, Prof. Dr Milton Cezar Costa Campos, Dr. Jhonatan Rafael Zárate Salazar e Dr. Alan Ferreira Leite Lima expresso minha profunda gratidão por acreditarem, apoiarem e incentivarem meu crescimento profissional. Agradeço também pelo acompanhamento nos momentos de dúvida.

Igualmente, manifesto meu apreço a alguns professores e profissionais que admiro muito e que se tornaram verdadeiros amigos. Agradeço-lhes imensamente. Grato a Deus, o autor e consumidor da minha fé, que proporcionou meu porto seguro, minha base, minha estrutura, à minha família. Aos meus pais Maria e Dalaias, que sempre acreditaram em seus filhos e se abdicaram de suas vidas por amor a nós. Aos meus irmãos Andréia, Adriana, Dejalma e Juliane, que são minha fortaleza em meio às tempestades. Aos meus cunhados Edivan e Ralbeni, que me apoiam como irmãos.

EPÍGRAFE

O solo é muito mais do que 'sujeira' sob nossos pés; é uma entidade multifuncional capaz de suportar uma multidão incompreensível de vida, incluindo humanos (Pozza & Field, 2020).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA.....	3
3. HIPÓTESE.....	4
4. OBJETIVO	5
4.1. Objetivo geral.....	5
4.2. Objetivos específicos.....	5
5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
5.1. Qualidade do solo	6
5.2. Serviços ecossistêmicos do solo	7
5.3. Unidade de conservação	9
5.4. Parque Nacional Mapinguari - AM	10
6. MATERIAL E MÉTODOS	12
6.1. Área de estudo	12
6.2. Metodologia de campo	13
6.3. Análises Físicas do solo	13
6.3.1. Textura de solo	13
6.3.2. Densidade de solo	14
6.3.3. Porosidade do solo	14
6.3.4. Resistência à penetração de solo	14
6.3.5. Umidade gravimétrica e volumétrica do solo	14
6.3.6. Estabilidade de agregados	15
6.3.7. Matéria orgânica	15
6.4. Análises Químicas	15
6.4.1. pH	16
6.4.2. Cálcio	16
6.4.3. Acidez potencial	16
6.4.4. Potássio e Fósforo.....	16
6.5. Análises estatísticas	17
7. RESULTADOS	18
7.1. Análise descritiva dos dados	18
7.1.1. Atributos físicos do solo	18
7.2. Efeito dos ambientes na agregação do solo	23
7.3. Efeito dos ambientes na textura do solo	27
7.4. Efeito dos ambientes na Porosidade do solo	28
7.5. Efeito dos ambientes na densidade, umidade, resistência à penetração do solo	30
7.6. Efeito dos ambientes no acúmulo de carbono, matéria orgânica e estoque de carbono do solo	31
7.6.1 Atributos Químicos do Solo	32
8. DISCUSSÃO	37
8.1 Efeito dos ambientes nos atributos do solo	37
8.2. Interação entre os ambientes e os atributos do solo	40
8.3. Serviços ecossistêmicos do solo	42
9. CONCLUSÕES	44
10. REFERÊNCIAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Atributos e indicadores da qualidade do solo.....	7
Figura 2 – Principais serviços ecossistêmicos.....	9
Figura 3 – Mapa de localização do Parque Nacional Mapinguari.....	12
Figura 4 - Boxplot e teste de médias dos agregados do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	26
Figura 5 - Boxplot e teste de média da textura do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	28
Figura 6 - Boxplot e teste de média da porosidade do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	29
Figura 7 - Boxplots e teste de comparação de médias da densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RSP), umidade gravimétrica (Ug) e umidade volumétrica (Uv) em diferentes ambientes do Parque Nacional do Mapinguari, sul do Amazonas. A linha azul indica a média. Letras minúsculas diferentes entre os ambientes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	31
Figura 8 - Boxplot e teste de média do carbono e matéria orgânica do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	31
Figura 9 - Boxplot e teste de média do estoque de carbono do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	32
Figura 10 - Boxplot e teste de média do pH, Al^{3+} e carbono do solo em diferentes ambientes e profundidades no Parque Nacional Mapinguari. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	33
Figura 11 - Boxplot e teste de média para os atributos químicos do solo (P, K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) em diferentes ambientes no Parque Nacional Mapinguari. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....	35
Figura 12 - Boxplot e teste de média da capacidade de troca catiônica (CTC) e da	

saturação por bases (V%) do solo em diferentes ambientes no Parque Nacional Mapinguari. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.....36

Figura 13- Plano fatorial dos atributos físico e químico do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari.....40

Figura 14-Serviços ecossistêmicos por ambiente.....43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Análises descritivas e teste de normalidade dos dados dos agregados, textura e carbono do solo em diferentes ambientes no Parque Nacional Mapinguari..... **19**

Tabela 2- Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos físico-hídricos do solo em diferentes ambientes na camada de 0,00-0,15 m no Parque Nacional Mapinguari **23**

Tabela 3- Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos químicos do solo em diferentes ambientes no Parque Nacional Mapinguari..... **32**

RESUMO

O solo é um componente essencial dos ecossistemas terrestres, atuando como base para a vida ao sustentar a vegetação, regular os ciclos da água e dos nutrientes, armazenar carbono e contribuir para o equilíbrio climático global. Esses processos naturais estão diretamente ligados aos serviços ecossistêmicos, que representam os benefícios que o solo oferece à sociedade, como a regulação climática, a ciclagem de nutrientes, a produção de alimentos, a manutenção da biodiversidade e a purificação da água. A pesquisa teve como objetivo avaliar os atributos físicos e químicos do solo e sua relação com os serviços ecossistêmicos em diferentes ambientes do Parque Nacional do Mapinguari, no sul do Amazonas, visando compreender como as condições edáficas e fisiográficas influenciam na oferta desses serviços. Foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0–15 cm e 40–60 cm em áreas sob floresta densa, floresta de inundação, campo natural e zona de transição, analisando textura, densidade, porosidade, resistência à penetração, agregação, umidade, pH, cálcio, magnésio, potássio, alumínio, fósforo, acidez potencial e carbono orgânico. Os dados foram submetidos a análises estatísticas descritivas e multivariadas (PCA) para identificar os atributos que mais discriminam os ambientes. Os resultados indicaram que os solos florestais apresentaram melhores condições físicas e químicas, com maior estabilidade estrutural, retenção hídrica e teores de carbono, desempenhando papel relevante na regulação climática e no sequestro de carbono. Já os campos naturais e áreas de transição, embora menos férteis, contribuíram para a recarga hídrica e manutenção da biodiversidade. Conclui-se que os solos do Parque Mapinguari são fundamentais para a oferta de serviços ecossistêmicos, evidenciando a importância de sua conservação para a sustentabilidade ambiental e o equilíbrio ecológico da Amazônia.

Palavras-chaves: Amazônia; Sustentabilidade; Unidades de Conservação

ABSTRACT

Soil is an essential component of terrestrial ecosystems, serving as the foundation of life by supporting vegetation, regulating water and nutrient cycles, storing carbon, and contributing to global climate balance. These natural processes are directly linked to ecosystem services, which represent the benefits that soil provides to society, such as climate regulation, nutrient cycling, food production, biodiversity maintenance, and water purification. Given this relevance, the present study aimed to evaluate the physical and chemical attributes of soils and their relationship with ecosystem services in different environments of the Mapinguari National Park, southern Amazonas, seeking to understand how edaphic and physiographic conditions influence the provision of these services. Soil samples were collected at depths of 0–15 cm and 40–60 cm in areas under dense forest, floodplain forest, natural grassland, and transition zones, analyzing texture, density, porosity, penetration resistance, aggregation, moisture, pH, calcium, magnesium, potassium, aluminum, phosphorus, potential acidity, and organic carbon. Descriptive and multivariate statistical analyses (PCA) were used to identify the most relevant attributes in differentiating the environments and in the provision of soil ecosystem services. The results showed that forest soils presented better physical and chemical conditions, with greater structural stability, water retention capacity, and higher organic carbon content, emphasizing their importance in climate regulation and carbon sequestration. In contrast, natural grassland and transition soils, although less fertile, play a crucial role in groundwater recharge and biodiversity maintenance. It is concluded that the soils of the Mapinguari National Park are key elements in the provision of ecosystem services, reinforcing the importance of their conservation as an essential strategy for environmental sustainability and the ecological balance of the Amazon.

Keywords: Amazon; Sustainability; Conservation units

1. INTRODUÇÃO

O solo é a camada superficial mais fina da camada terrestre, sendo o resultado do processo de intemperismo e das interações que ocorrem ao longo do tempo entre litosfera, atmosfera, hidrosfera e biosfera (Jenny, 1941). Em síntese, o solo é um recurso natural limitado que sustenta várias funções dos ecossistemas e serviços associados, incluindo armazenamento de água, produção de alimentos, purificação do ar e da água, além de servir como suporte para outros serviços ecossistêmicos (SEs) (Rodrigues et al., 2021).

Para o funcionamento do ecossistema, o solo é essencial e crucial para o controle do clima, qualidade da água, ciclos biogeoquímicos e biodiversidade (Doran e Parkin, 1994; Costanza et al., 1998). Esses processos estão conectados às funções ecossistêmicas, cujos processos naturais, geram os serviços ecossistêmicos, que correspondem aos benefícios que a sociedade recebe. Esses serviços são classificados em quatro categorias: suporte, provisão, regulação e cultural, que refletem as diversas maneiras pelas quais o solo contribui para o bem-estar humano. (Vogel et al., 2019b; Dominati; Patterson; Mackay, 2010a).

A degradação dos ecossistemas tem comprometido a capacidade do solo de desempenhar suas funções devido às pressões antrópicas, o que pode gerar consequências graves que se estendem além do âmbito ambiental, incluindo impactos econômicos, sociais e de saúde pública (Reygadas; Spera; Salisbury, 2023; Alves Pessoa et al., 2023; Costanza et al., 2017a).

Desta forma torna-se necessário compreender como as condições edáficas e fisiográficas influenciam a prestação de serviços ecossistêmicos. Nesse trabalho foram analisados atributos físicos do solo (textura, densidade, porosidade, resistência à penetração, agregação e umidade) e atributos químicos (pH, cálcio, magnésio, potássio e alumínio trocáveis, acidez potencial (H+Al), fósforo disponível e carbono orgânico) em duas profundidades: 0–15 cm e 40-60 cm. Em áreas Neossolo Flúvico, Plintossolo Argilúvico, Latossolo e Gleissolo Háplico (em área de transição) e o Plintossolo Háplico (associado a campos naturais).

Nesse contexto, a avaliação das propriedades físicas e químicas do solo em áreas protegidas de florestas e campos naturais da Amazônia é de grande relevância científica e ambiental (Vogel et al., 2023a). Esses atributos são manifestados como

resultado da combinação de fatores físicos, químicos e biológicos que interagem no solo, gerando características únicas que podem influenciar na sua fertilidade, estrutura e função ecológica. Por isso, é possível concluir que os atributos do solo são propriedades dinâmicas e complexas, que dependem da manifestação de outras qualidades de sistemas interconectados, como a vegetação, o clima, a topografia e a geologia (Reicher et al., 2006).

Diante desse cenário, torna-se imprescindível compreender e avaliar as funções ecossistêmicas do solo e os serviços providos por ele, este estudo teve como objetivo avaliar as propriedades físicas e químicas do solo em áreas sob transição floresta–campo natural no Parque Nacional Mapinguari -AM, relacionando essas propriedades com as funções ecológicas e os serviços ecossistêmicos do solo. Essa abordagem permitirá compreender como as condições edáficas e fisiográficas influenciam na prestação de serviços ecossistêmicos, gerando subsídios para estratégias de manejo sustentável e conservação da unidade.

2. JUSTIFICATIVA E PROBLEMÁTICA

O solo é um recurso natural fundamental para a manutenção da vida na Terra, sustentando funções ambientais essenciais e fornecendo serviços ecossistêmicos indispensáveis a sociedade humana, tais como suporte à produção de alimentos, regulação climática, ciclagem de nutrientes e conservação da biodiversidade (Doran & Parkin, 1994; FAO, 2020). Em regiões tropicais como a Amazônia, esses serviços são especialmente relevantes devido à elevada pressão antrópica, como nas atividades de expansão agrícola e exploração de recursos naturais, que comprometem a qualidade ambiental e a integridade dos ecossistemas (Alves Pessoa et al., 2023; Reygadas et al., 2023).

O Parque Nacional Mapinguari, unidade de conservação, situada no sul do estado do Amazonas, representa uma importante porção de floresta amazônica em área de fronteira agrícola, sendo alvo de degradação ambiental e alterações no uso do solo. A carência de estudos voltados à avaliação das funções e serviços ecossistêmicos dos solos desta Unidade de Conservação limita a compreensão sobre sua contribuição para a sustentabilidade do ecossistema local.

Nesse contexto, este estudo justifica-se por buscar preencher essa lacuna científica ao avaliar, de forma técnica e sistemática, os serviços ecossistêmicos do solo na FLONA Mapinguari, identificando os benefícios proporcionados por esse recurso para o meio ambiente e para a sociedade. Os resultados poderão subsidiar a melhoria estratégica de manejo sustentável, conservação dos solos e formulação de políticas públicas, contribuindo para a valorização e preservação dos serviços ecossistêmicos prestados por essa Unidade de Conservação.

3. HIPÓTESE

A transição de floresta para campo natural no Parque Nacional Mapinguari, na Amazônia Ocidental, Brasil, apresenta diferenças significativas nos atributos físicos e químicos do solo, que resultam em maior potencial para retenção de água e estoque de carbono nos solos florestais em comparação aos solos de campo natural.

4. OBJETIVO

4.1. Objetivo geral

Avaliar os atributos químicos e físicos do solo em função da prestação de serviços ecossistêmicos em áreas sob transição floresta para campo natural no Parque Nacional Mapinguari, Amazônia ocidental, Brasil.

4.2. Objetivos específicos

Avaliar os atributos químicos do solo (pH em água, Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e Al^{3+} trocáveis, $\text{H}^+\text{+Al}$, P disponível) em áreas sob transição floresta para campo natural no Parque Nacional Mapinguari, Amazônia ocidental, Brasil.

Avaliar os atributos físicos do solo (textura, densidade do solo, porosidade, resistência do solo à penetração, agregação e umidade) em áreas sob transição floresta para campo natural no Parque Nacional Mapinguari, Amazônia ocidental, Brasil.

Determinar os teores de carbono orgânico total (COT) do solo, quantificar os estoques de carbono orgânico do solo (ECOS) e sua relação com o ambiente em áreas sob transição florestal para campo natural no Parque Nacional Mapinguari, Amazônia ocidental, Brasil.

Analisar o efeito dos ambientes amostrados sobre os atributos físicos e químicos do solo em função das condições edáficas e fisiográficas.

Discutir sobre os diferentes serviços ecossistêmicos proporcionados pelo solo sob os diferentes ambientes fisiográficos estudados.

5. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

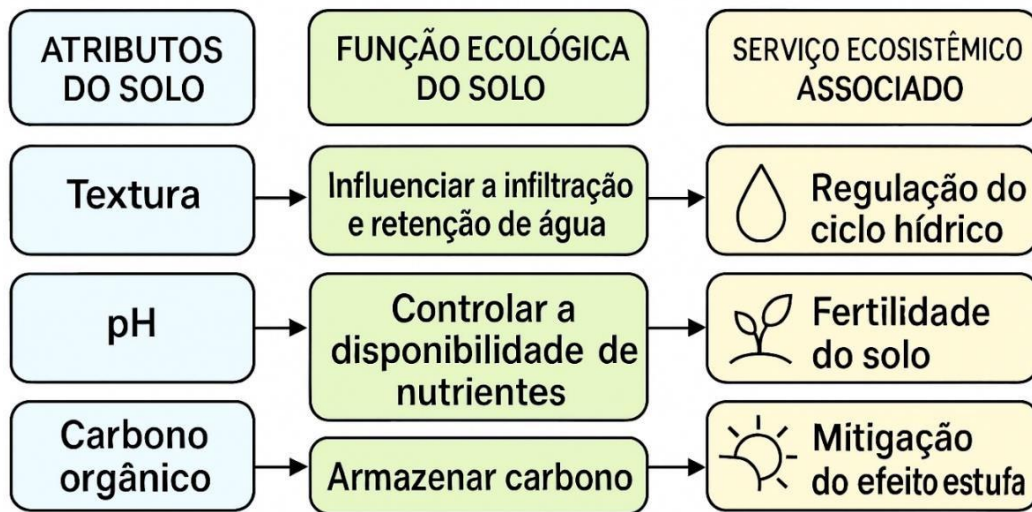
5.1. Qualidade do solo

A qualidade do solo é definida como a capacidade contínua do solo de funcionar como um ecossistema vivo essencial que sustenta plantas, animais e seres humanos, promovendo o bom funcionamento dos ecossistemas terrestres (Karlen et al., 1997; Doran e Parkin, 1994). Segundo Lal (2016) a qualidade e a saúde do solo estão interligadas, sendo esta compreendida como um sistema vivo, capaz de sustentar a produtividade biológica e a qualidade ambiental.

Os atributos do solo são definidos como propriedades emergentes resultantes da interação entre as características intrínsecas do solo e as condições ambientais circundantes. Eles decorrem da combinação de fatores físicos, químicos e biológicos que interagem no solo, gerando características únicas que influenciam sua fertilidade, estrutura, função ecológica e os serviços ecossistêmicos. São dinâmicos e complexos, pois dependem da manifestação dos fatores de formação, como a vegetação, o clima, a topografia e o tempo (Silva et al., 2021; Valani et al., 2022)

As propriedades essenciais à saúde e à qualidade do solo estão classificadas em quatro categorias: (1) físicos, utilizados para avaliar a qualidade e a funcionalidade do solo em diferentes sistemas, garantindo o fornecimento de água, a troca gasosa e o habitat; (2) químicos, que determinam a fertilidade, dando sustentação às plantas e aos organismos vivos; (3) biológicos, relacionados à diversidade microbiana, que fornece energia e promove a ciclagem de nutrientes; e (4) ecológicos, essenciais para a integridade do ambiente, contribuindo para a biodiversidade. Essas propriedades fornecem um ambiente saudável e favorável à vida (Lal, 2016; Carmo et al., 2018; Centeno et al., 2017; Freitas; Fonseca; Figueiredo, 2022).

Figura 1—Atributos e indicadores da qualidade do solo.



Fonte: Adaptado de Dominati et al 2010.

De acordo com Dominati et al. (2010), os atributos do solo são a base para as funções e serviços ecossistêmicos. Dessa forma, o equilíbrio ecológico dos solos florestais, conectados à sua qualidade e saúde, se constituem uma base indispensável para a manutenção dos processos ecológicos, que sustentam o vínculo ecossistêmicos.

5.2. Serviços ecossistêmicos do solo

Segundo Costanza et al. (1999), os serviços ecossistêmicos derivam das funções ecossistêmicas, que são processos naturais, como a fotossíntese, a ciclagem de nutrientes e a polinização. As funções correspondem às capacidades naturais dos ecossistemas de realizar processos e manter estruturas que sustentam a vida, enquanto os serviços são os benefícios efetivamente percebidos pelos seres humanos. A análise dos serviços ecossistêmicos possibilita entender de que maneira os ecossistemas oferecem uma gama de vantagens para a humanidade, de forma direta ou indireta (FAO 2023).

O solo, enquanto conjunto de recursos, envolve processos como armazenamento de água, regulação do clima e habitat para micro-organismos, que participam da ciclagem de nutrientes e são essenciais para o crescimento das plantas e a fixação de carbono. Todas essas funções contribuem para a saúde e a produtividade dos ecossistemas, que dependem do bom funcionamento dessas funções para gerar os demais serviços ecossistêmicos (Costa et al., 2024; Dominati;

Patterson; Mackay, 2010).

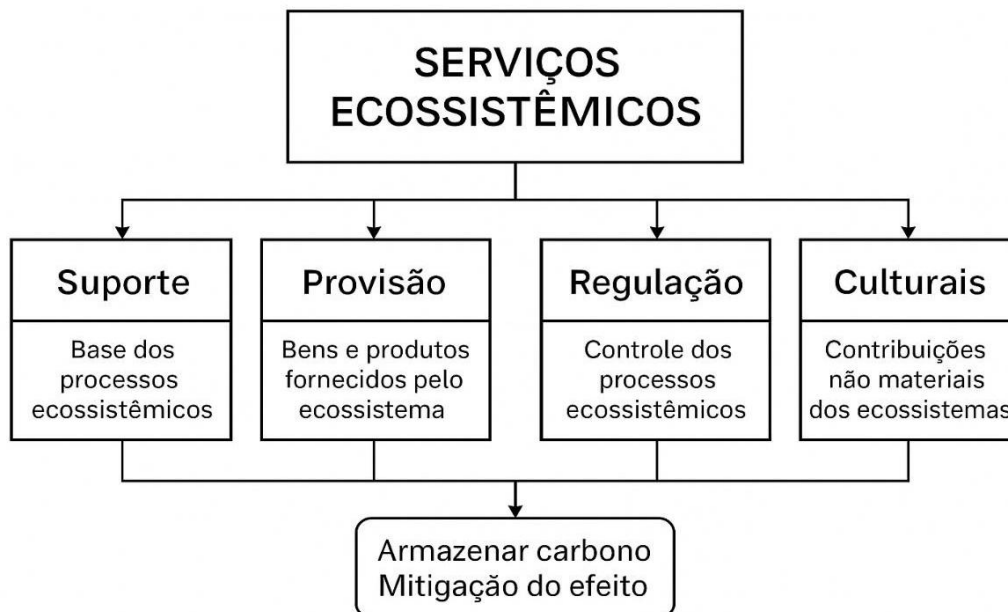
É fundamental garantir benefícios duradouros tanto para as populações humanas quanto para a biodiversidade. Conforme o Relatório da Avaliação Ecosistêmica do Milênio, divulgado pela ONU em 2005, categoriza os serviços ecossistêmicos em quatro grupos: serviços de provisão, que incluem alimentos, água e combustíveis, consumidos ou comercializados pelo ser humano; serviços de regulação, como a modulação do clima e a qualidade do ar e da água, raramente passíveis de serem replicados pelo homem (Reid, 2005).

Os serviços culturais são estéticos, espirituais e recreativos, não podendo o homem mensurar plenamente sua importância. Já os serviços de suporte incluem o ciclo de nutrientes, a formação do solo e a fotossíntese, sendo o solo a base para que ocorram todos os serviços citados. As funções ecossistêmicas não se limitam a um único serviço; uma função pode gerar dois ou mais serviços, ou um único serviço pode resultar de múltiplas funções (Costanza et al., 2017b; Reid, 2005)

O papel do solo e suas funções é intrincado, mas as ações humanas têm promovido alterações nos ecossistemas, ocasionando desequilíbrios que comprometem sua capacidade de fornecer serviços essenciais. O capital natural do solo refere-se ao conjunto de recursos que ele oferece, constituído por processos naturais que garantem saúde e produtividade, servindo como base para os serviços ecossistêmicos. (Dominati; Patterson; Mackay, 2010; Oliveira et al., 2023).

O fluxograma abaixo ilustra como os atributos do solo influenciam suas funções ecológicas e os serviços ecossistêmicos associados.

Figura 2– Principais serviços ecossistêmicos



Fonte: Adaptado de Dominati et al 2010.

5.3. Unidade de conservação

Conforme informações disponibilizadas pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Amazonas (SEMA, 2021), atualmente existem aproximadamente 42 unidades de conservação ambientais preservadas, as quais correspondem a 57,3% da extensão territorial sobre áreas protegidas, englobando unidades de conservação em níveis estadual, federal e Terras Indígenas. Deste modo, a região se destaca por ser a que apresenta o maior número de Unidades de Conservação (UCs) (Souza et al., 2024). Instituído pela Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000, o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC) compreende o conjunto de UCs de competência federal, estadual e municipal, conforme delineado no artigo 2º, inciso I, da mencionada legislação.

I - Unidade de conservação: espaço territorial e seus recursos ambientais, incluindo as águas jurisdicionais, com características naturais relevantes, legalmente instituído pelo Poder Público, com objetivos de conservação e limites definidos, sob regime especial de administração, ao qual se aplicam garantias adequadas de proteção (Brasil, 2000).

Conforme estabelecido pelo Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC), as unidades de conservação no Brasil são categorizadas em duas classes principais: as Unidades de Proteção Integral, cujo objetivo primordial é a preservação da natureza, sendo vedado qualquer uso direto dos recursos naturais nelas contidos. Por outro lado, as Unidades de Uso Sustentável visam harmonizar a conservação da natureza com a utilização sustentável de determinadas porções de seus recursos naturais (Souza et al., 2024). Essas áreas são essenciais para a manutenção de ecossistemas específicos e para o equilíbrio ambiental local (Rodrigues et al., 2021). As áreas protegidas são indispensáveis para a saúde do planeta e de seus habitantes, desempenhando um papel fundamental na provisão de serviços ecossistêmicos que sustentam a vida na Terra, como a regulação da quantidade e qualidade da água, a fertilidade e conservação dos solos, a estabilidade das encostas, a manutenção da qualidade do ar e a mitigação das mudanças climáticas (Young; Medeiros, 2018).

5.4. Parque Nacional Mapinguari - AM

O Parque Nacional Mapinguari (PARNA), situado nos municípios de Canutama e Lábrea, no estado do Amazonas, bem como em Porto Velho, em Rondônia, encontra-se na iminente fronteira do arco do desmatamento na região noroeste da Amazônia, delimitado pelos rios Purus e Madeira. Criado pelo decreto presidencial de 5 de julho de 2008.

A criação do PARNA teve como finalidade primordial a mitigação do desmatamento, em virtude de sua elevada biodiversidade. No interior de seus limites, observa-se uma variedade de tipos de vegetação, que inclui Florestas, campos naturais e savanas amazônicas (Rodrigues et al., 2023).

Este patrimônio encontra-se situado em regiões de baixadas, assentando-se sobre substratos de arenito silto-argiloso, com coloração amarelo-avermelhada, os quais pertencem à Formação Içá (Melo e Villas Boas, 1993). Essas áreas são compostas por sedimentos quaternários datados dos períodos Pleistoceno e Holoceno. Em contrapartida, nas zonas de planalto, a geologia é definida por rochas metamórficas feldspáticas, metaconglomerados, filitos, quartzitos micáceos e xistos micáceos de granulação fina, oriundos da Formação Mutum-Paraná. Ademais,

observa-se a presença de uma cobertura detrito-laterítica, proveniente do período Pleistoceno (CPRM, 1999).

Os solos que predominam na área em questão são os Argissolos Vermelho-Amarelo e os Latossolos Vermelho-Amarelo; contudo, também se observa uma presença significativa de Gleissolos Háplicos, Espodossolos Humilúvicos e Neossolos Flúvicos (ICMBio/MMA, 2018). A proposta de preservar a estética e os ecossistemas naturais do Parque Nacional Mapinguari está fundamentada na conservação de uma das regiões mais ricas em biodiversidade da Amazônia. Tal preservação é imprescindível para assegurar a biodiversidade local, a qual constitui uma fonte de subsistência para as comunidades extrativistas nas localidades de Lábrea-AM e Canutama-AM (Rodrigues et al., 2023).

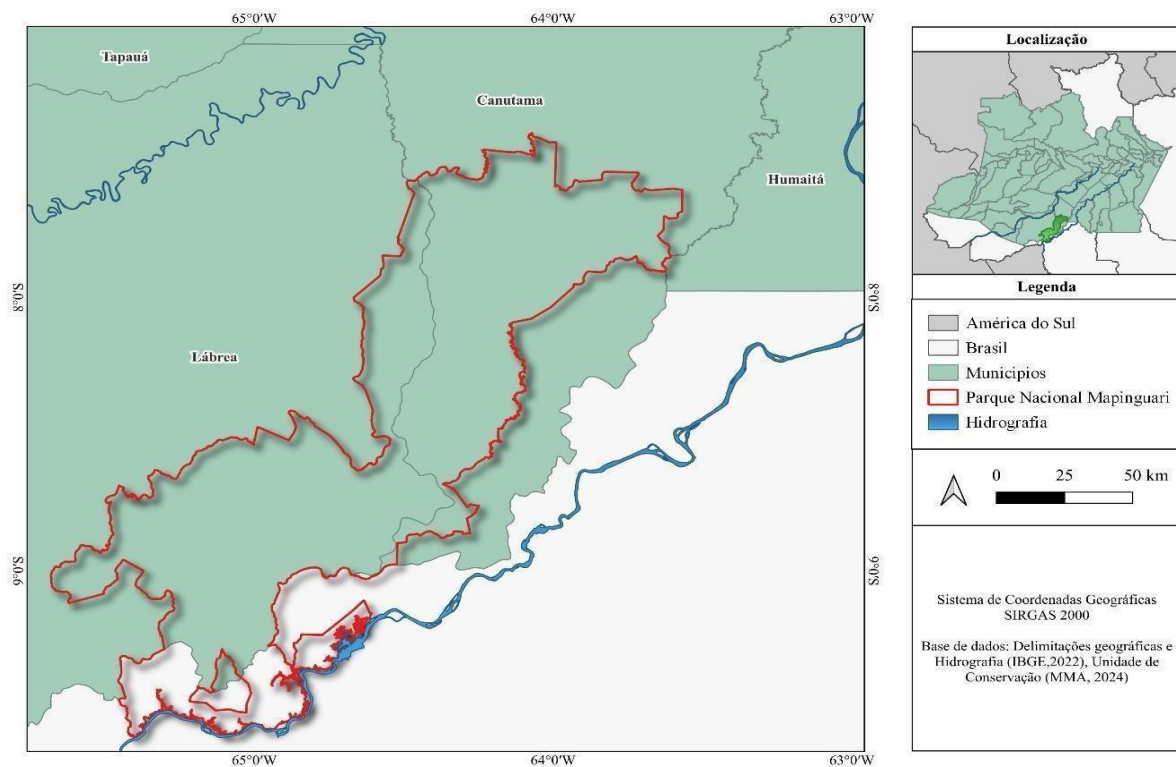
6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1. Área de estudo

O Parque Nacional Mapinguari localiza-se ao sul do Amazonas, em sua região de influência, que inclui Canutama e Lábrea, no estado do Amazonas, além de Porto Velho, no estado de Rondônia. A região possui uma área total de aproximadamente 1.776.914,18 hectares, abrigando diversos ecossistemas isolados e únicos. Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima é do tipo tropical com monções (Am), variando de 22,9 °C a 26,5 °C. O parque está situado entre as latitudes 2°17'30"N e 9°51'10"S e longitudes 56°4'45"W e 73°48'20"W (Martins et al., 2023).

O Parque Nacional Mapinguari está situado nas regiões meridional e setentrional, com fronteiras adjacentes à BR-364, que interliga os estados de Rondônia e Acre. No extremo norte, a Unidade de Conservação (UC) está próxima à BR-230, denominada Transamazônica, estabelecendo a ligação entre Humaitá e Lábrea, no estado do Amazonas. O Parque Nacional é a maior Unidade de Conservação do interflúvio Purus-Madeira.

Figura 3 – Mapa de localização do Parque Nacional Mapinguari



Fonte: Autor

6.2. Metodologia de campo

Ao longo do percurso do transecto linear em ambiente de floresta e campo natural com variações de relevo e vegetação foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo nas profundidades de 0-15 cm e 40-60 cm. Foram realizados dez pontos de amostragem equidistantes selecionado a partir de cinco ambientes distintos partindo da floresta para a área de campo natural: ambiente 1: floresta de inundação (Neossolo Flúvico); ambiente 2: floresta densa (Plintossolo); ambiente 3: floresta densa (Latossolo); ambiente 4: zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) e ambiente 5: campo natural (Gleissolo), totalizando 100 amostras de solos.

Com auxílio de altímetro foram realizadas mensurações das altitudes para a confecção de um gráfico de perfil altimétrico ao longo do transecto linear. Ao final das coletas, foram obtidas 100 amostras de solo (torrões), as quais foram levadas inicialmente para o galpão e 100 amostras de solo com estrutura preservada em anéis volumétricos, que foram encaminhadas para o laboratório e mantidas em temperatura controlada para posteriores análises.

6.3. Análises Físicas do solo

6.3.1. Textura de solo

A textura do solo foi determinada pelo método pipeta. Foi utilizado o extrator NaOH 0,1 N como dispersante, e com auxílio do aparelho de agitação rotativo as amostras foram agitadas na velocidade de 50 rpm por 16 horas de acordo com a metodologia prescrita por (Teixeira et al., 2017). De cada amostra foram pipetadas 50 ml da suspensão para a determinação da fração argila.

Após colocadas em estufa a 105 °C, posteriormente pesadas em balança digital de precisão. As frações de areia fina e areia grossa foram separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas para a obtenção de suas frações em massa. Logo após o silte foi obtido pela diferença entre as frações de argila e areia em relação à amostra original de 20 gramas de solo conforme a metodologia de (Teixeira et al., 2017).

6.3.2. Densidade de solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método cilindro volumétrico. A obtenção da massa das amostras de solo coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³ nas camadas 0-15 cm de solo pesadas e determinação do volume. Os demais procedimentos metodológicos foram conforme Almeida et. (2013).

6.3.3. Porosidade do solo

A macro (MaP), Meso (MeP) e microporosidade (MiP) do solo foram determinadas pelo método mesa de tensão. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³. Em bandeja foram colocados os anéis, após colocada água na bandeja, disposta em até dois terços da altura do anel coberta por insulfilmes. Antes e após a saturação os anéis volumétricos foram pesados, e levados à mesa de tensão para determinação de micro, Meso e macroporosidade do solo, os demais procedimentos foram conforme de Teixeira et al. (2017). A porosidade total (Pt) de solo foi determinada pelo método direto. As amostras indeformadas foram saturadas com água, após calculado a diferença do solo saturado e do solo seco em estufa (Teixeira et al., 2017).

6.3.4. Resistência à penetração de solo

A resistência do solo a penetração (RSP) foram determinadas a partir das amostras indeformadas de solo coletadas em anéis de volumétricos das camadas 0-15 cm em 10 pontos equidistantes. Com auxílio de um penetrômetro eletrônico de bancada, com velocidade constante de 0,0667 mm s⁻¹, haste com ponteira de 4 mm atingiu o centro de cada amostra de solo, os demais procedimentos foram conforme o de Teixeira et al. (2017).

6.3.5. Umidade gravimétrica e volumétrica do solo

A umidade gravimétrica (U_g) e volumétrica (U_v) de solo foi obtida pela diferença do peso úmido das amostras e peso seco solo seco, conforme a metodologia de Teixeira et al. (2017).

6.3.6. Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados foi determinada pelo método de Kemper & Kamp; Chepil (1965), com adaptações nas seguintes classes de diâmetro das peneiras: 4,76-2,0 mm; 2,0-1,0 mm; 1,0-0,50 mm; 0,50-0,25 mm; 0,25-0,125; 0,125-0,063 mm. Os agregados foram determinados em via úmida sendo colocados em contato com a água sobre a peneira de 2,0 mm por 15 minutos e com 32 oscilações por minuto, em um aparelho Yoder (SOLOTEST) em agitação vertical, a massa do material retido em cada peneira foi, posteriormente, seca em estufa a 105 °C por 24 horas, até atingir peso constante. Em seguida, as respectivas massas foram determinadas em balança digital de precisão. Os resultados desta análise foram expressos em percentual dos agregados retidos nas peneiras >2,0; 1,0-2,0 e <1,0 mm, diâmetro médio ponderado (DMP) este, obtido pela fórmula proposta por Castro Filho et al. (1998), e o diâmetro médio geométrico (DMG), segundo Schaller, Kamp e Stockinger (1953).

6.3.7. Matéria orgânica

Foram realizadas análises químicas referentes à determinação da matéria orgânica (M.O), estimada com base no carbono orgânico total de acordo com metodologia de Walkley-Black, e modificada por Yeomans; Bremner, 1988.

6.4. Análises Químicas

Após o solo ter passado por processo de secagem a sombra e ser peneirado numa malha de 2 mm (mesmo solo utilizado para textura), caracterizando uma Terra Fina Seca ao Ar (TFSA), serão realizadas as análises química, segundo a metodologia proposta por Teixeira et al. (2017), onde será determinado o pH em água e em KCl, acidez potencial (H+Al), alumínio trocável (Al^{3+}), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), fósforo (P), potássio (K^{+}), carbono orgânico total (COT) e estoque de carbono (EC).

6.4.1. pH

Em água e KCl foram determinados potenciometricamente, utilizando pHmetro na relação solo: em água e KCl de 1:2,5. Para fins de classificação dos solos será calculado o $\Delta\text{pH} = \text{pH (KCl)} - \text{pH (H}_2\text{O)}$.

6.4.2. Cálcio

O cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e alumínio trocável (Al^{3+}) foram extraídos por solução de KCl 1 mol L⁻¹. Os teores de Al^{3+} s foram determinados por titulometria, utilizando NaOH a 0,025 mol L⁻¹ e azul de bromotimol como indicador colorimétrico. Já os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrometria de absorção atômica.

6.4.3. Acidez potencial

Os (H+Al) foram extraídas com acetato de cálcio tamponado a pH 7,00 e determinada por titulometria utilizando NaOH a 0,025 mol L⁻¹ e fenolftaleína como indicador.

6.4.4. Potássio e Fósforo

O potássio e o fósforo disponíveis foram extraídos por *Mehlich-1*. Os teores de P serão determinados por espectrofotômetro-UV-vis e os teores de K + por espectrofotometria de chama. Com base nas determinações dos cátions trocáveis e acidez potencial foram calculados: capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva e potencial; soma de bases (SB), saturação por bases (V) e saturação por alumínio (m). O carbono orgânico total (COT) será determinado pelo método de Walkley-Black, modificado por Yeomans e Bremner (1988).

O estoque de carbono (EC) será calculado pela Eq. 2:

$$\text{EC} = (\text{Ds} \times \text{h} \times \text{COT}) / 10 \text{ em que:}$$

EC = estoque de

carbono (t ha⁻¹); Ds =

densidade do solo (g cm⁻³);

h = espessura da camada de solo amostrada (cm); COT = Carbono orgânico (g kg^{-1})

6.5. Análises estatísticas

Após a determinação dos atributos físicos e orgânicos do solo, os dados foram submetidos às análises univariada e multivariada, no software estatístico Statistica 7 (Statsoft, 2004).

A estatística univariada foi avaliada através da estatística descritiva, onde foram calculados a média, mediana, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria e curtose. Sendo confeccionados os gráficos de boxplot, com intuito de representar as estatísticas descritivas e distribuição primária dos dados. As comparações das médias das variáveis dentro de cada ambiente estudado foram analisadas pelo teste de Tukey a 5 % de probabilidade. As hipóteses de normalidade dos dados dentro de cada ambiente foram testadas pelo teste de Shapiro Wilk (SW).

Para as análises multivariadas, foi realizada análise fatorial dos componentes principais (ACP), aos quais foram realizadas a fim de encontrar significância estatística dos conjuntos dos atributos do solo que mais discriminam os ambientes. A adequabilidade da análise fatorial foi feita pela medida de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO), que avalia as correlações simples e parciais das variáveis, e pelo teste de esfericidade de Bartlett, ao qual se pretende rejeitar a igualdade entre a matriz correlação com a identidade. A extração dos fatores foi realizada pela análise de componente principal, incorporando as variáveis que apresentaram comunalidades igual ou superior a cinco (5,0). A escolha do número de fatores a ser utilizado foi feita pelo critério de Kaiser (fatores que apresentam autovalores superiores a 1,0). A fim de simplificar a análise fatorial, foi feita a rotação ortogonal (varimax) sendo representada em um plano fatorial das variáveis e dos escores para os componentes principais (Burak et al., 2010).

7. RESULTADOS

7.1 Análise descritiva dos dados

7.1.1. Atributos físicos do solo

Na camada 0,00-0,15 m, a classe de agregados > 2 mm, nas áreas de floresta densa (Plintossolo, : zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo), floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresentou valores de Coeficiente de Variação entre 9,22% e 1,97%. O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) apresentou CV com classificações variadas: na Floresta de inundação (Neossolo Flúvico), o CV alto (17,73%); na Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) , muito baixo (3,60%); e nas áreas de Floresta densa (Latossolo) e Campo, baixos (7,73% e 8,36%, respectivamente).

A assimetria na Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) na Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) apresentaram uma distribuição simétrica, na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e na Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) (0,33 e 0,35, respectivamente). Na Floresta densa (Plintossolo), houve assimetria positiva (0,71 e 0,52), enquanto a maior variação foi observada na Floresta densa (Latossolo) (-0,75%). A curtose obteve um coeficiente de variação mais achatado variando entre 1,72 e 0,73. O teste de Shapiro-Wilk (SW) teve uma distribuição normal variando entre 0,905 e 0,993. Na Floresta de inundação (Neossolo Flúvico), obteve um coeficiente de variação (CV%) de 27,18%, caracterizando alta variabilidade, enquanto na Floresta densa (Plintossolo) foi de 6,37%, indicando maior uniformidade.

O CV da areia na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) foi de 14,30%, comparado a 8,31% na Floresta Plintossolo. A argila apresentou maior heterogeneidade na Floresta densa (Latossolo), com CV de 22,47%, em relação à floresta de inundação (Neossolo Flúvico), que teve CV de 15,62%. A assimetria do silte e da areia na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresentou valores baixos (0,48), enquanto na Floresta densa (Plintossolo) houve distribuição equilibrada, com assimetria negativa (-0,26).

Em todas as áreas, a argila apresentou assimetria negativa, destacando-se a Floresta densa (Latossolo) (-0,01). A densidade do solo variou entre as áreas, sendo menor na Floresta densa (Plintossolo) (3,38%) e maior na Floresta densa (Latossolo)

(5,26%), o que sugere maior homogeneidade na Floresta densa (Plintossolo). A assimetria na Floresta densa (Latossolo) foi de 0,02, enquanto na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) foi de -0,29. A Umidade Gravimétrica (Ug) apresentou assimetria negativa em todas as áreas, com valores mais altos na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (37,71%).

Já a Umidade Volumétrica (Uv) na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) teve alta variabilidade (32,96%) e curtose negativa (-1,54%). Nas áreas de Floresta densa (Plintossolo) e Floresta densa (Latossolo), os CVs da Uv foram menores (27,49% e 23,40%, respectivamente). A Resistência do Solo à Penetração (RSP) apresentou curtose positiva no Campo natural (Gleissolo) (2,06), enquanto o atributo MiP na Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) teve curtose negativa (- 1,54%). A Porosidade Total (Pt) apresentou maior CV nas áreas de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (8,40%) e na Floresta densa (Plintossolo) (7,35%). Os atributos MiP e MeP apresentaram altos coeficientes de variação na Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (26,07%), enquanto no Campo natural (Gleissolo) o MeP registrou CV de 24,19%.

Tabela 1- Análises descritivas e teste de normalidade dos dados dos agregados, textura e carbono do solo em diferentes ambientes no Parque Nacional Matinguari.

Parâmetro	CV%	Assimetri	Curtose	SW	CV%	Assimetri	Curtose	S
s		a				a		W
Profundidade 0 - 15 cm				Profundidade 40 - 60 cm				
Floresta de inundação (Neossolo Flúvico)								
> 2 mm	9,22	-0,94	0,09	0,94	3,77	-0,72	0,09	0,98
1 - 2 mm	27,07	-0,11	0,10	0,97	21,71	-0,88	1,35	0,96
< 1 mm	16,30	1,38	1,92	0,93	9,54	0,98	0,17	0,92
DMG	17,73	-0,33	-1,36	0,97	11,02	-0,14	-0,77	0,99
DMP	7,42	-1,10	0,60	0,94	3,57	-0,62	-1,12	0,94
Areia	14,30	-0,46	-1,86	0,93	10,76	0,09	-0,81	0,97
Silte	27,18	0,48	-1,78	0,94	18,76	-0,60	-0,28	0,97
Argila	15,62	0,42	-1,53	0,96	46,91	0,23	-1,95	0,94
COS	29,30	-0,32	-1,24	0,93	21,46	-0,04	-1,10	0,95

Floresta densa (Plintossolo)								
> 2 mm	4,19	0,09	-1,14	0,99	4,97	0,44	-0,65	0,95
1 - 2 mm	30,16	-0,21	-1,29	0,98	27,77	0,47	-1,05	0,97
< 1 mm	23,65	0,05	0,82	0,97	12,45	1,62	1,80	0,86
DMG	7,05	-0,71	1,72	0,96	15,82	-0,37	-0,83	0,99
DMP	3,31	-0,24	-0,36	0,99	3,79	-0,37	-0,53	0,97
Areia	8,31	-0,06	-1,77	0,96	17,23	-0,44	-1,09	0,98
Silte	6,37	0,26	-1,45	0,97	24,86	0,62	0,65	0,97
Argila	20,42	-0,51	-0,16	0,97	18,67	0,71	-0,92	0,94
COS	11,77	0,89	-0,79	0,84	16,18	-0,89	0,10	0,91
Floresta densa (Latossolo)								
> 2 mm	4,35	0,72	-0,03	0,94	9,85	0,31	-1,31	0,97
1 - 2 mm	25,46	-0,82	-0,41	0,95	18,60	1,42	1,70	0,92
< 1 mm	10,38	0,69	0,91	0,97	4,07	-0,09	0,17	0,98

DMG	7,73	-0,75	0,72	0,98	18,64	-0,19	-0,45	0,98
DMP	3,34	-0,56	-0,81	0,97	4,61	0,24	0,33	0,98
Areia	9,86	0,30	-1,25	0,98	15,18	0,21	-1,19	0,98
Silte	5,91	-0,27	-0,07	0,98	35,39	-0,35	-1,46	0,96
Argila	22,47	-0,01	-1,70	0,97	24,01	0,47	-1,32	0,96
COS	17,90	0,66	-0,46	0,94	10,50	0,03	-0,83	0,97
MOS	17,90	0,66	-0,46	0,94	10,50	0,03	-0,83	0,97
Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo)								
> 2 mm	1,97	0,34	-0,09	0,98	22,99	-1,35	2,13	0,94
1 - 2 mm	20,69	0,37	-0,51	0,99	18,42	0,49	0,25	0,98
< 1 mm	19,40	-0,03	0,46	0,98	24,01	1,37	2,32	0,94
DMG	3,60	-0,35	-0,74	0,97	31,19	-0,57	-0,36	0,98
DMP	1,72	0,27	-0,24	0,98	17,17	-1,43	2,46	0,94
Areia	24,89	0,69	-1,39	0,91	29,26	-0,33	-1,40	0,98
Silte	13,22	0,06	-0,06	0,98	23,07	0,76	0,14	0,97
Argila	24,63	-0,25	-1,16	0,96	20,78	-0,75	0,09	0,97
COS	20,53	-0,38	-1,73	0,88	15,56	-0,31	-1,06	0,95
Campo natural (Gleissolo)								
> 2 mm	9,38	-0,73	-0,73	0,96	31,16	1,00	0,34	0,93
1 - 2 mm	38,45	-0,24	-0,32	0,99	36,69	1,57	2,97	0,92
< 1 mm	29,31	0,61	-0,19	0,97	2,79	-1,40	1,97	0,91
DMG	8,36	-0,52	0,73	0,98	11,47	0,41	-1,22	0,95
DMP	7,67	-0,87	-0,49	0,94	21,56	1,02	0,51	0,94
Areia	10,01	-0,19	-0,87	0,98	13,45	-1,64	3,27	0,92
Silte	4,72	-0,72	0,77	0,95	9,04	-1,42	0,88	0,87
Argila	14,05	1,01	-0,10	0,94	39,58	1,52	1,12	0,87
COS	11,20	-0,53	-1,01	0,93	20,24	0,89	-1,18	0,77

Na profundidade 40-60 cm, na classe de agregado > 2mm em Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (3,77%), Floresta densa (Plintossolo) (4,97%) e Floresta densa (Latossolo) (9,85%) teve baixa variabilidade no (Diâmetro Médio Ponderado) DMP em Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (3,57%), Floresta densa (Plintossolo) (3,79%) e Floresta densa (Latossolo) (4,61%). Portanto na classe <1 mm, em Campo natural (Gleissolo) obteve uma baixa variabilidade, já a classe de agregados 1-2 mm apresentou uma média variabilidade em todas as áreas, porém tendo destaque em Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e Floresta densa (Latossolo) (21,71% e 18,67%).

Os atributos que também apresentou valores médios silte na Floresta densa (Plintossolo) (24,86%) e Argila na Campo natural (Gleissolo) (23,07%) o coeficiente de variação na Floresta densa (Latossolo) e Floresta densa (Plintossolo) para Argila foi de (24,01% e (18,67%). A classe de agregado 1-2 mm em Campo natural (Gleissolo)

(36,69%) e Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) (18,42%) apresentou uma alta variabilidade. O Diâmetro Médio Geométrico DMG apresentou alta variabilidade Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) (31,19%). A areia também apresentou alta variabilidade em Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) (29,26%). A assimetria na classe de agregados 1-2mm apresentou uma assimetria positiva em Campo e Florestas (1,57 e 0,49) a argila teve uma variabilidade maior em Campo natural (Gleissolo) (1,52) tendo também o DMP positivo em Campo e Florestas (1,02 e 0,27). O Silte em Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) apresentou uma assimetria positiva (0,76).

Na classe de agregados 1-2 mm, foram observados valores negativos em floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e Floresta densa (Plintossolo) (-0,88 e (-0,49). Na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) foram observados valores negativos nos atributos DMG e DMP em Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (-0,14) e Floresta densa (Plintossolo) (-0,37). A areia em floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresentou assimetria próximo de zero (0,09). Nas classes de agregados 1-2 mm, a curtose em Campo natural (Gleissolo) e Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) apresentou os maiores valores (2,97 e 0,25) houve valores alto de curtose na classe de agregados 1-2 mm também em Campo natural (Gleissolo) e Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) (1,97 e 2,32).

A Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) para DMP apresentou o maior valor (2,46), porém a areia teve uma curtose negativa em Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e Floresta densa (Plintossolo) (-0,81 e -1,09). Em Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e Floresta densa (Plintossolo) os atributos DMG e DMP apresentaram distribuição achatados com valores entre -0,77 e 0,53 também na classe de agregados 1-2mm a Floresta densa (Plintossolo) apresentou curtose negativa (-1,05).

No teste de Shapiro-Wilk (SW) para a classe de agregados > 2mm (0,979) e DMP (0,944). A Floresta densa (Plintossolo) na classe de agregados 1-2 mm foi (0,967) e o DMG (0,979) o que indica uma maior normalidade pois apresenta valores próximos a 1. A Floresta densa (Latossolo) apresentou valores altos de DMP (0,976) e a classe de agregados <1mm (0,981). Houve valores baixos SW em Campo natural (Gleissolo) também na classe <1 mm (0,911) e no DMP (0,935).

Tabela 2- Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos físico-hídricos do solo em diferentes ambientes na camada de 0,00-0,15 m no Parque Nacional Mapinguari.

Parâmetros	Ds	Ug	Uv	Pt	MiP	MeP	MaP	RSP	ECS
Floresta de inundação (Neossolo Flúvico)									
CV%	13,96	37,71	32,96	8,40	26,07	31,88	48,60	17,88	20,68
Assimetria	-0,29	-0,35	-0,04	-1,47	-1,54	-1,00	1,26	1,39	-0,96
Curtose	-1,83	-0,60	1,73	3,60	2,64	1,63	1,44	1,58	-0,02
SW	0,95	0,99	0,96	0,93	0,92	0,95	0,94	0,93	0,89
Floresta densa (Plintossolo)									
CV%	3,38	29,73	27,49	7,35	23,25	36,97	39,06	21,43	14,00
Assimetria	0,83	-0,25	-0,29	1,08	-0,28	-0,41	0,84	-0,36	0,92
Curtose	0,55	-0,93	-0,78	0,62	0,63	-0,14	-0,18	0,78	-0,60
SW	0,96	0,97	0,97	0,95	0,95	0,98	0,96	0,98	0,89
Floresta densa (Latossolo)									
CV%	5,26	27,18	23,40	11,00	23,40	26,41	35,10	17,88	20,11
Assimetria	0,02	0,38	0,44	-0,65	0,44	0,91	0,97	0,39	1,19
Curtose	-1,50	-0,85	-0,97	-0,58	-0,97	0,24	1,85	-0,44	0,61
SW	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,95	0,95	0,95	0,84
Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo)									
CV%	8,85	18,91	18,32	9,56	14,40	24,19	41,96	14,76	22,92
Assimetria	0,40	0,22	0,00	-0,78	0,45	-0,44	0,76	1,36	-0,19
Curtose	-1,32	-1,72	-0,79	-0,37	-1,18	0,98	0,24	2,06	-1,66
SW	0,97	0,96	0,98	0,96	0,97	0,98	0,93	0,93	0,91
Campo natural (Gleissolo)									
CV%	8,72	14,46	13,26	7,67	13,26	22,32	35,28	35,90	15,27
Assimetria	0,06	-0,81	-1,09	-0,56	-1,09	-1,08	0,79	0,32	-0,32

7.2. Efeito dos ambientes na agregação do solo

Os agregados do solo apresentaram diferenças significativas entre os ambientes estudados para as classes >2 mm, 1-2 mm e <1 mm na profundidade de 0-15 cm. Nas áreas de Florestas foram apresentadas as maiores porcentagens de classe de agregados na classe >2mm com (86,83% e 91,68%) sendo também a área de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (64,15%) e Campo natural (Gleissolo) (73,51%). Entretanto na classe 1-2 mm nas áreas de Campo natural (Gleissolo) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) foram observados valores médios de 7,29% e 7,23%, relativamente, superiores nas áreas de Floresta (4,87% e 1,74%). Portanto, nas frações de <1 mm, nas áreas de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e Campo natural (Gleissolo) foram observados os maiores (28,62% e 19,20%) apontando que há uma proporção maior de agregados de menor diâmetro. Entretanto, nas áreas de

Floresta apresentam uma porcentagem mais baixa (8,30% e 6,58%).

Para a classe > 2 mm, os maiores valores foram observados nas áreas de floresta (91,68% e 86,83%), seguida pela área de Campo natural (Gleissolo) (73,51%) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (64,15%). Nas áreas de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e Campo natural (Gleissolo) nas classes de agregados 1-2 mm, foram observados valores maiores do que nas áreas de florestas, onde Campo natural (Gleissolo) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresentaram (7,23% e 7,29%) e nas áreas de Florestas (4,87%). Na classe < 1 mm, os maiores valores estão representados nas áreas de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (28,62%) e Campo natural (Gleissolo) (19,20%) e as áreas de Florestas apresentaram as menores médias (8,30% e 6,58%). Os maiores valores para a classe de agregados > 2 mm, sobressai na Floresta densa (Plintossolo) 65,30% e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (63,01%), enquanto os menores valores foram apresentados no Campo natural (Gleissolo) (5,95%). Para a classe de agregados 1-2 mm, em florestas densa (Plintossolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo).

A Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) teve os maiores valores entre (10,78% e 17,51%) onde o Campo natural (Gleissolo) apresentou média menor de (2,89%). Na classe de agregado < 1 mm, teve valores maiores em ambiente de Campo natural (Gleissolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) (91,21% e 37,31%). Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Diâmetro Médio Ponderado (DMP) apresentou A Floresta densa (Plintossolo) apresentou DMG de 1,51 mm e DMP de 2,38 mm tiveram os maiores diâmetros, decorrente do Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) com DMG de 1,16 mm e DMP de 2,26 mm. Em compensação no Campo natural (Gleissolo) teve os menores valores com DMG de 0,10 mm e DMP de 0,34 mm.

Na classe de agregado > 2 mm, a Floresta densa (Plintossolo) e o Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresentam as maiores proporções (65,30% e 63,01%) em relação a área de Campo natural (Gleissolo) que teve o menor diâmetro (5,95%). Porém para a classe de agregados 1-2 mm a média nas áreas de Floresta densa (Plintossolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) entre (10,78% a 17,51%) enquanto a área de Campo natural (Gleissolo) teve a menor média (2,84%). Para a classe de agregado < 1 mm, nas áreas de Campo natural (Gleissolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) apresentou os maiores valores (91,21%) e (37,31%). Em comparação ao Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Diâmetro Médio Ponderado (DMP) apresentaram valores altos bem como o DMG na área de Floresta

densa (Plintossolo) com 1,51mm e o DMP 2,38mm. O Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) também apresentou um valor alto no DMG de 1,16 mm e DMP de 2,26 mm. Portanto, no Campo o DMG de 0,10 mm e DMP de 0,34 mm apresentaram valores mais baixos. Na classe de agregado $> 2\text{mm}$, a Floresta densa (Plintossolo) e o Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresentam as maiores proporções (65,30% e 63,01%) em relação a área de Campo natural (Gleissolo) que teve o menor diâmetro (5,95%). Porém para a classe de agregados 1-2 mm a média nas áreas de Floresta densa (Plintossolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) entre (10,78% a 17,51%) enquanto a área de Campo natural (Gleissolo) teve a menor média (2,84%).

Para a classe de agregado $< 1\text{mm}$, nas áreas de Campo natural (Gleissolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) apresentou os maiores valores (91,21%) e (37,31%). Em comparação ao Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Diâmetro Médio Ponderado (DMP) apresentaram valores altos bem como a DMG na área de Floresta densa (Plintossolo) com 1,51mm e o DMP 2,38mm. O Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) também apresentou um valor alto no DMG de 1,16 mm e DMP de 2,26 mm. Portanto, no Campo natural (Gleissolo) o DMG de 0,10 mm e DMP de 0,34 mm apresentaram valores mais baixos.

Apesar dos valores da estatística descritiva, porém, o teste de comparação de médias para estabilidade de agregados (Figura 2) aponta a formação de pelo menos de três a quatro grupos distintos com diferença significativa entre as médias por atributo. De maneira geral, todos os ambientes amostrados, na camada superficial, apresentaram uma proporção de agregados com tamanho superior a 2mm superior a 50%.

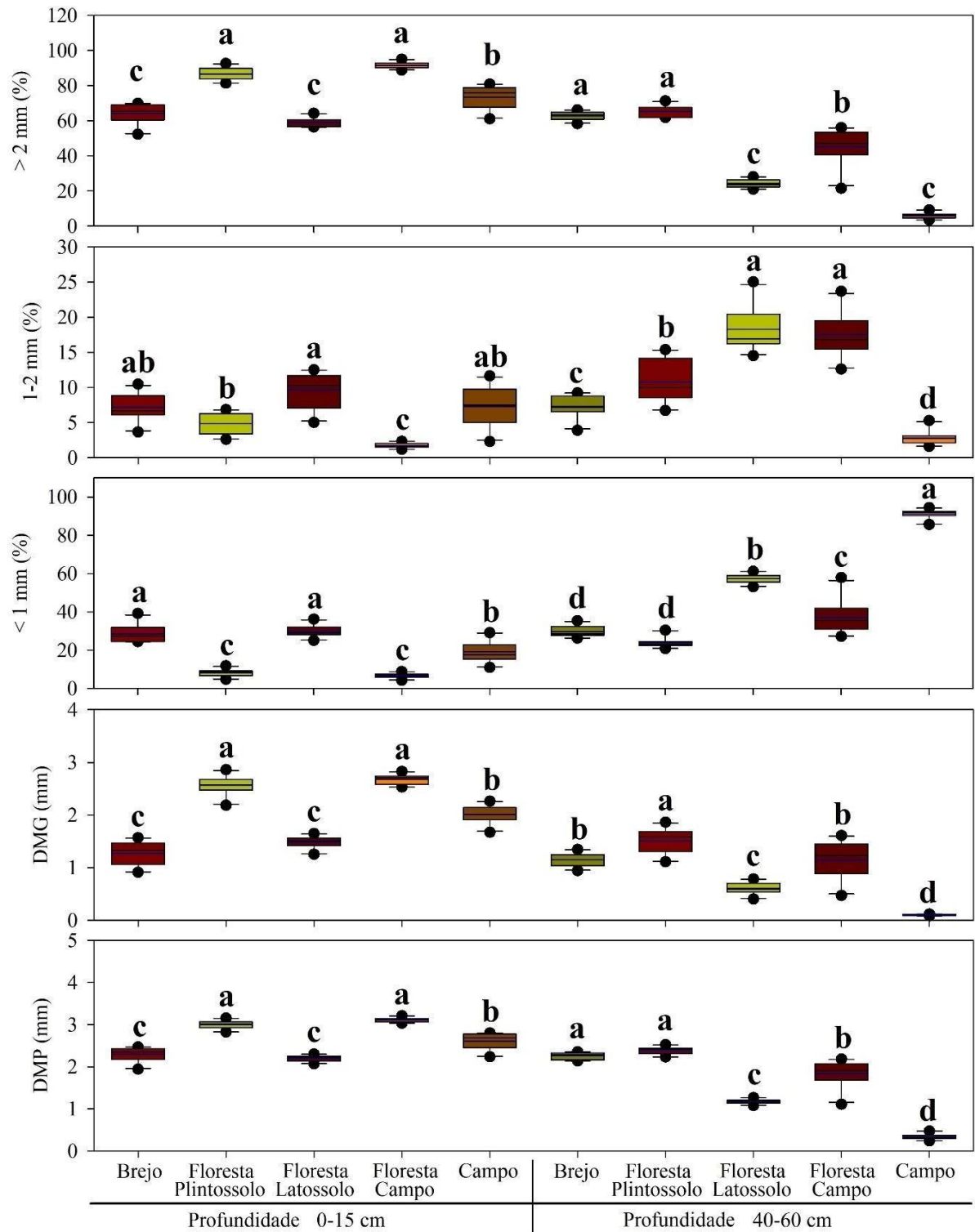


Figura 4- Boxplot e teste de médias dos agregados do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey

7.3. Efeito dos ambientes na textura do solo

A argila apresentou valores altos na floresta densa (Plintossolo) com (367,90 g kg⁻¹) na área de Campo natural (Gleissolo) foi observado um menor valor. A análise granulométrica indicou variações importantes na textura do solo entre os ambientes. Ambientes de Floresta Plintossolo apresentaram maiores teores de argila (367,90 g kg⁻¹), enquanto ambientes de Campo natural (Gleissolo) (153,36 g kg⁻¹). Já no teor de Silte o Campo natural (Gleissolo) apresentou valores maiores em campo e Floresta (675,20 g kg⁻¹ e 412,86 g kg⁻¹).

Os maiores valores para a classe de agregados >2 mm, sobressai na Floresta densa (Plintossolo) 65,30%) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (63,01%), enquanto os menores valores foram apresentados no Campo (5,95%). Para a classe de agregados 1-2 mm, em florestas Plintossolo e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) teve os maiores valores entre (10,78% e 17,51%) onde o Campo natural (Gleissolo) apresentou média menor de (2,89%). Na classe de agregado < 1mm, teve valores maiores em ambiente de Campo natural (Gleissolo) e Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) (91,21% e 37,31%). Diâmetro Médio Geométrico (DMG) e Diâmetro Médio Ponderado (DMP) apresentou

A Floresta densa (Plintossolo) apresentou DMG de 1,51 mm e DMP de 2,38 mm tiveram os maiores diâmetros, decorrente do Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) com DMG de 1,16 mm e DMP de 2,26 mm. Em compensação no Campo natural (Gleissolo) teve os menores valores com DMG de 0,10 mm e DMP de 0,34 mm. A argila apresentou valores altos na floresta densa (Plintossolo) com (367,90 g kg⁻¹) na área de Campo natural (Gleissolo) foi observado um menor valor.

A análise granulométrica indicou variações importantes na textura do solo entre os ambientes. Ambientes de Floresta densa (Plintossolo) apresentaram maiores teores de argila (367,90 g kg⁻¹), enquanto ambientes de Campo natural (Gleissolo) (153,36 g kg⁻¹). Já no teor de silte o Campo natural (Gleissolo) apresentou valores maiores em campo e Florestas (675,20 g kg⁻¹ e 412,86 g kg⁻¹). O teste de média, por sua vez, sugere diferença significativa dos atributos apenas para o ambiente Floresta de inundação (Neossolo Flúvico), enquanto os demais possuem pouca ou nenhuma diferença significativa entre si. Este comportamento aparenta continuar em profundidade.

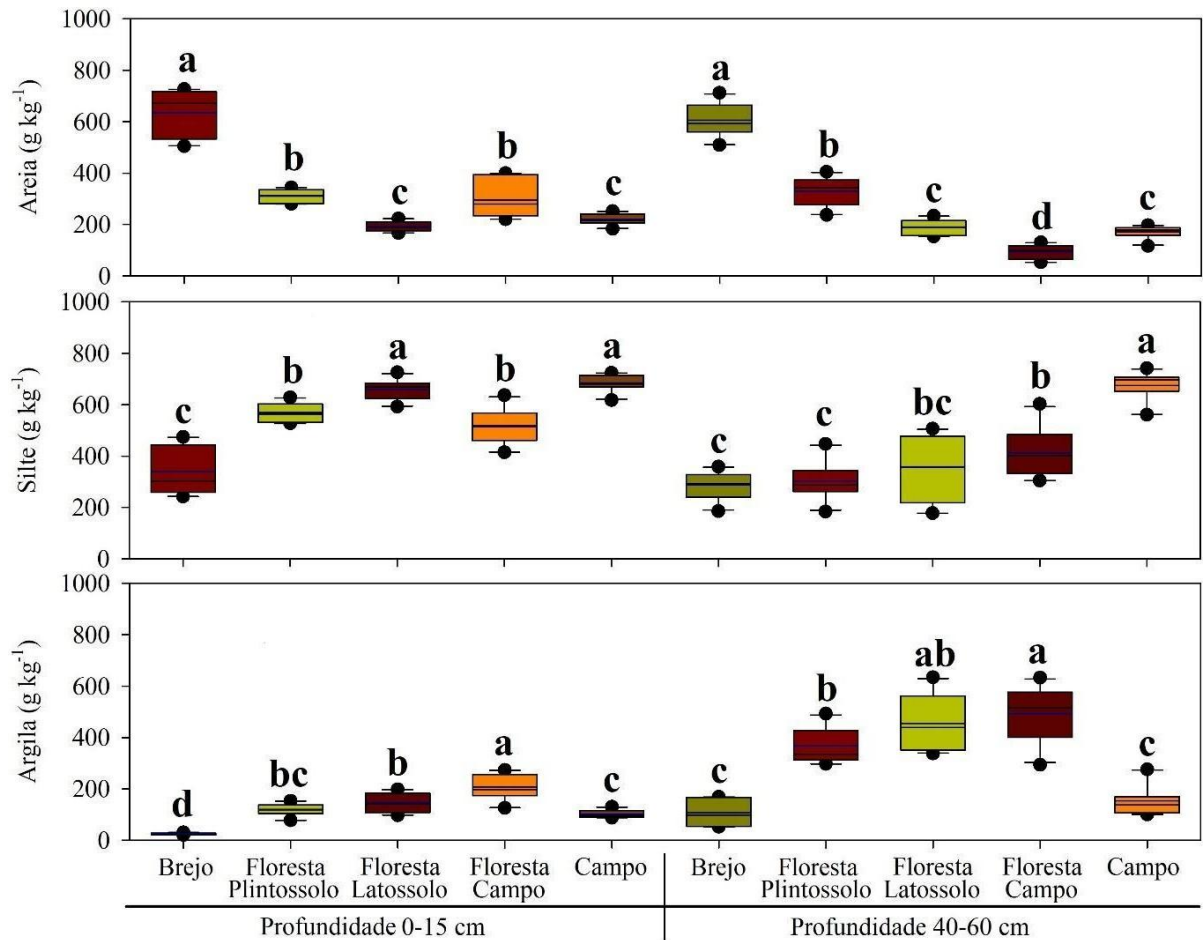


Figura 5- Boxplot e teste de média da textura do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5

7.4. Efeito dos ambientes na Porosidade do solo

A maior macroporosidade (MaP) é encontrada nas áreas de Florestas (0,15 m³ m⁻³ e 0,13 m³ m⁻³), e na área Campo natural (Gleissolo) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (0,14 m³ m⁻³ e 0,14 m³ m⁻³). A microporosidade (MiP) apresenta os valores mais elevados nas florestas (0,54 m³ m⁻³), os valores mais elevados na área de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (0,42 m³ m⁻³) e os mais baixos nas áreas florestais (0,34 m³ m⁻³). Valores elevados de porosidade (PT) também são encontrados nas áreas de Florestas, Campo natural (Gleissolo) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) (0,81 m³ m⁻³ e 0,68 m³ m⁻³ e 0,67 m³ m⁻³ e 0,68 m³ m⁻³).

A microporosidade (MiP) apresentou o maior valor em Campo natural (Gleissolo) com (0,54 m³ m⁻³) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) com (0,42 m³ m⁻³), e o menor valor foi nas áreas de Florestas (0,34 m³ m⁻³). Valores maiores também foram encontrados para

Porosidade total (PT), em áreas de Florestas, Campo natural (Gleissolo) e Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) ($0,81 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,68 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,67 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e $0,68 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). A densidade do solo na área de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) teve uma média de $1,07 \text{ g cm}^{-3}$, esses valores foram variando entre $0,88$ e $1,27 \text{ g cm}^{-3}$, nesse contexto a umidade gravimétrica alcançou uma média de $0,42 \text{ kg.kg}^{-1}$, tendo um coeficiente de variação (CV%) de 37,71% o que indica uma alta variabilidade. A média da resistência à penetração foi de 0,8258. A densidade na Floresta densa (Plintossolo) obteve uma média alta de $1,50 \text{ g cm}^{-3}$, tendo uma menor variação (CV% 3,38%).

A umidade gravimétrica apresentou média de $0,22 \text{ kg.kg}^{-1}$, tendo um valor mínimo de $0,13 \text{ kg.kg}^{-1}$. A resistência à penetração teve uma distribuição homogênea de 0,96 MPa. A densidade em área de Campo natural (Gleissolo) teve uma média de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$ e a umidade gravimétrica foi de $0,38 \text{ kg.kg}^{-1}$, e resistência à penetração teve uma média de 0,39 MPa, com um elevado coeficiente de variação (35,90%) tendo uma alta variabilidade.

Os testes de médias, por sua vez, sugeriram a formação de dois a três grupos com diferença significativa entre os atributos nos ambientes estudados. Com exceção de Pt e MiP, os ambientes amostrados apresentaram pouca ou nenhuma diferença significativa entre si. Nesses atributos, as análises apontam diferença significativa apenas para a Zona de transição floresta/campo (Cambissolo).

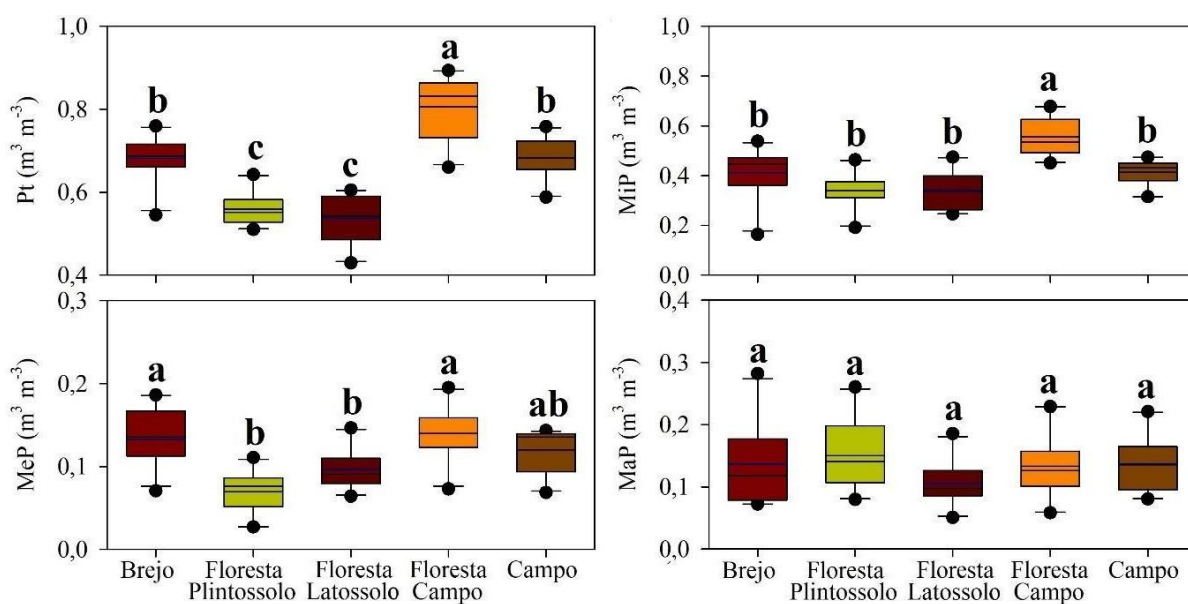


Figura 6- Boxplot e teste de média da porosidade do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.

7.5. Efeito dos ambientes na densidade, umidade, resistência à penetração do solo

A densidade do solo na área do Floresta de inundação (Neossolo Flúvico) apresenta média de $1,07 \text{ g cm}^{-3}$, apresentando variações entre $0,88 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,27 \text{ g cm}^{-3}$, apresentando também um coeficiente de variação (CV%) de 13,96%, significando igualdade e uniformidade de distribuição. A umidade gravimétrica teve média de $0,42 \text{ kg}^{-1}$ e coeficiente de variação de 37,71%, indicando alta variabilidade. Porém, a penetração teve uma média de 0,83 MPa. Na Floresta densa (Plintossolo) foi observada a maior densidade, com média de $1,50 \text{ g cm}^{-3}$ e baixo coeficiente de variação (3,38%), indicando equilíbrio na distribuição. A umidade gravimétrica apresentou uma média de $0,22 \text{ kg kg}^{-1}$, o valor mínimo é de $0,13 \text{ kg.kg}^{-1}$, a resistência à penetração é de 0,96 MPa e a distribuição é uniforme. A densidade média na área do Campo natural (Gleissolo) é de $1,10 \text{ g cm}^{-3}$, o coeficiente de variação é de 8,72% e a umidade máxima é de $0,38 \text{ kg.kg}^{-1}$. Portanto, em comparação com outras áreas, a resistência à penetração é baixa (0,39 MPa), mas o coeficiente de variação é alto (35,90%). Em comparação com outras áreas, a resistência à penetração é baixa (0,39 MPa), mas o CV% é elevado (35,90%).

O teste de média, por sua vez, identificou a diferença significativa na formação de dois a três grupos por atributo em função do ambiente analisado. Em todos os atributos, a Floresta densa (Plintossolo) e a Floresta densa (Latosolo) apresentaram diferenças significativas em relação aos demais ambientes. A Zona de transição floresta/campo (Cambissolo), por sua vez, novamente apresentou diferença significativa em relação aos demais ambientes em todos os atributos.

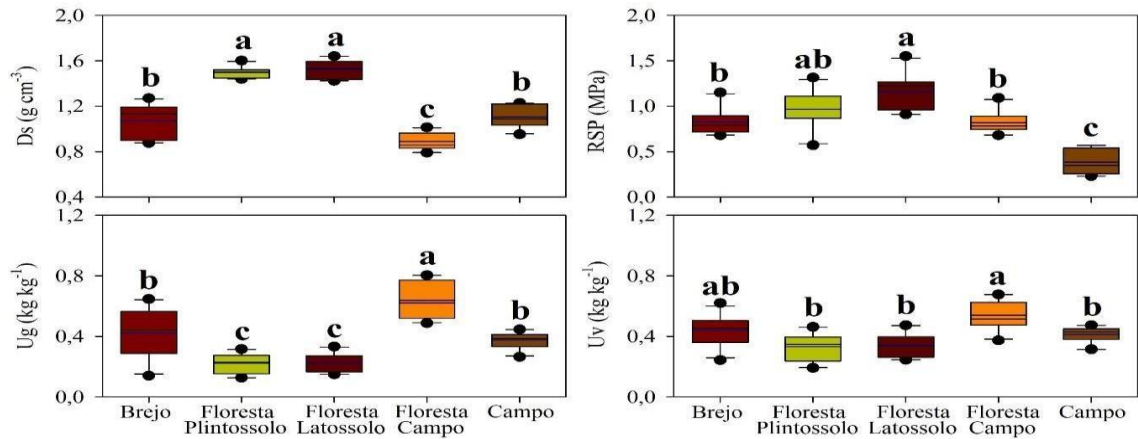


Figura 7- Boxplots e teste de comparação de médias da densidade do solo (D_s), resistência à penetração (RSP), umidade gravimétrica (U_g) e umidade volumétrica (U_v) em diferentes ambientes do Parque Nacional do Mapinguari, sul do Amazonas. A linha azul indica a média. Letras minúsculas diferentes entre os ambientes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

7.6. Efeito dos ambientes no acúmulo de carbono, matéria orgânica e estoque de carbono do solo

Os testes de média apontam diferenças significativas na Zona de transição floresta/campo (Cambissolo), em todos os atributos analisados, nas duas profundidades, em relação aos demais ambientes analisados.

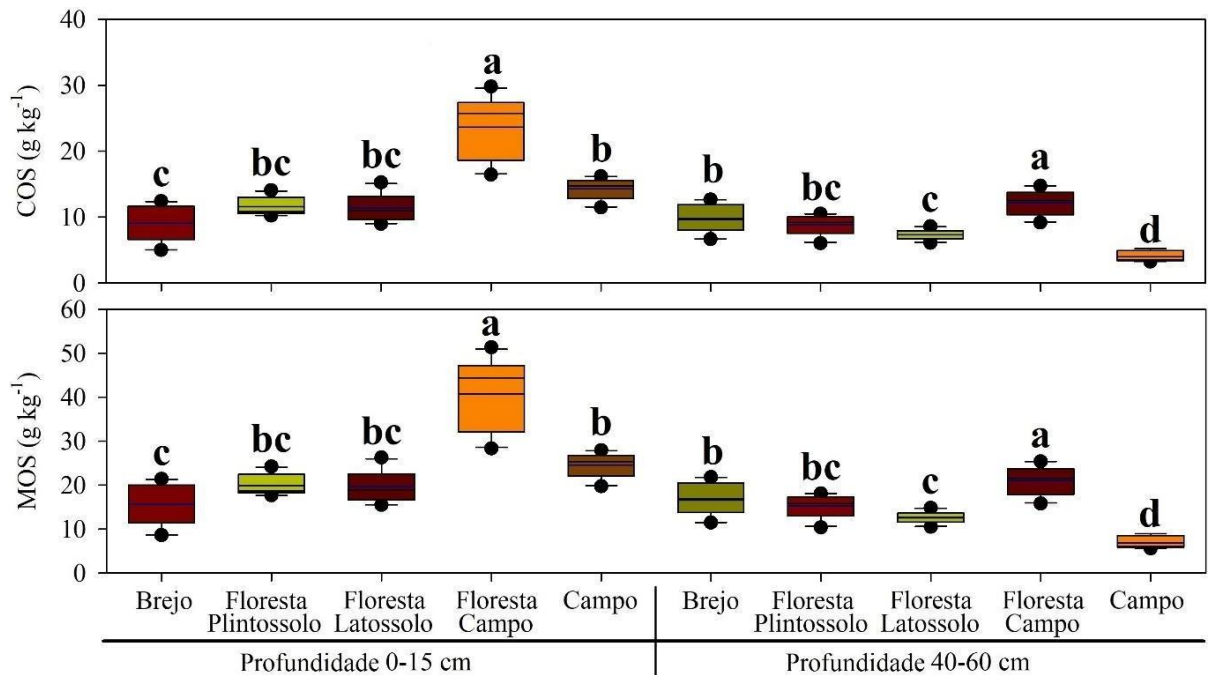


Figura 8-Boxplot e teste de média do carbono e matéria orgânica do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.

ECS apresentou comportamento similar às demais análises de carbono do solo, com o ambiente Zona de transição floresta/campo (Cambissolo) apresentando diferença significativa dos demais ambientes analisados.

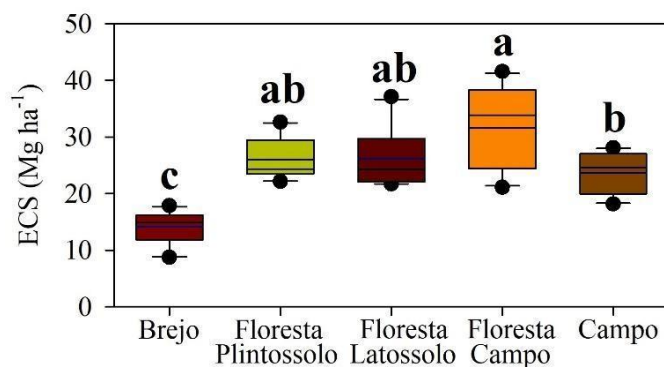


Figura 9- Boxplot e teste de média do estoque de carbono do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Matinguari. A linha azul indica o valor médio dos dados. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.

7.6.1. Atributos químicos do solo

Tabela 3- Análises descritivas e teste de normalidade dos atributos químicos do solo em diferentes ambientes no Parque Nacional Matinguari.

Parâmetros		CV% ¹	Assimetria	Curtose	SW	CV% ¹	Assimetria	Curtose	SW
		Profundidade 0 - 15 cm				Profundidade 40 - 60 cm			
Floresta de inundação (Neossolo Flúvico)									
pH	CaCl ₂	9,12	-1,00	-0,18	0,85	25,60	-0,37	-1,51	0,90
Presina	mg kg ⁻¹	30,08	0,41	-1,65	0,87	27,54	-0,40	-1,07	0,89
Al ³⁺	cmol _c kg ⁻¹	62,65	0,58	-0,39	0,96	63,51	0,38	-1,43	0,91
H+Al	cmol _c kg ⁻¹	43,82	0,09	-1,27	0,94	35,54	-0,71	-1,36	0,83
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	38,37	0,06	-1,79	0,91	18,03	-0,29	-0,96	0,93
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	13,78	-0,12	0,58	0,92	33,92	0,90	-0,70	0,84
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	41,11	1,21	0,24	0,82	56,94	1,77	2,95	0,78
CTC	cmol _c kg ⁻¹	21,50	1,23	2,81	0,93	34,42	-0,60	-1,34	0,86
V	%	42,70	1,47	2,23	0,87	32,62	0,42	-1,07	0,92
Floresta densa (Plintossolo)									
pH	CaCl ₂	3,71	-0,75	1,50	0,93	4,09	0,62	-1,16	0,86
Presina	mg kg ⁻¹	34,74	-0,06	-1,69	0,91	51,54	0,01	-0,73	0,96
Al ³⁺	cmol _c kg ⁻¹	16,83	0,13	-0,37	0,99	30,66	-0,51	-0,71	0,95
H+Al	cmol _c kg ⁻¹	13,94	0,31	0,29	0,97	12,30	0,02	-1,37	0,92
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	18,01	0,65	-0,63	0,93	26,14	0,61	-0,69	0,94
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	9,26	0,06	0,66	0,99	11,03	0,21	-0,41	0,97
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	24,65	0,64	-1,24	0,87	13,65	1,50	1,41	0,74
CTC	cmol _c kg ⁻¹	10,97	0,16	-0,04	0,97	12,11	0,03	-1,37	0,92
V	%	14,67	-0,84	1,44	0,94	20,14	0,59	-0,10	0,95
Floresta densa (Latossolo)									
pH	CaCl ₂	1,70	-0,13	0,18	0,79	1,95	0,17	-0,73	0,83
Presina	mg kg ⁻¹	20,42	-0,23	-1,95	0,87	42,79	0,56	-0,06	0,95
Al ³⁺	cmol _c kg ⁻¹	7,81	-0,62	0,66	0,96	8,57	-1,43	2,28	0,87
H+Al	cmol _c kg ⁻¹	9,52	-0,55	-1,40	0,88	9,20	-0,41	-1,06	0,92
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	17,17	1,66	3,39	0,85	15,36	0,03	-0,73	0,98
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	7,30	0,12	-1,41	0,94	4,90	0,77	-0,14	0,92

Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	45,75	2,59	7,55	0,67	26,95	0,52	-1,82	0,81
CTC	cmol _c kg ⁻¹	7,28	-0,76	-0,62	0,89	9,12	-0,41	-1,09	0,91
V	%	29,13	1,97	4,44	0,78	15,88	0,54	0,04	0,95
Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo)									
pH	CaCl ₂	1,74	0,43	-0,28	0,80	2,15	0,81	1,24	0,84
Presina	mg kg ⁻¹	18,58	0,19	-1,19	0,95	68,68	-0,30	-1,80	0,88
Al ³⁺	cmol _c kg ⁻¹	25,12	-0,40	-1,61	0,89	23,66	-1,13	0,52	0,88
H+Al	cmol _c kg ⁻¹	5,46	1,68	3,61	0,85	14,25	-0,97	1,37	0,94
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	22,92	0,70	-0,80	0,90	35,72	1,00	0,82	0,91
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	7,39	-0,42	-0,37	0,96	44,83	2,51	6,55	0,64
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	9,40	0,74	-0,99	0,86	11,79	0,21	-1,20	0,95
CTC	cmol _c kg ⁻¹	5,18	1,73	3,85	0,84	14,22	-0,94	1,34	0,94
V	%	5,76	-0,14	-1,59	0,91	16,67	0,61	-0,38	0,93
Campo natural (Gleissolo)									
pH	CaCl ₂	1,61	0,80	-1,04	0,73	3,28	2,60	7,14	0,56
Presina	mg kg ⁻¹	27,52	0,73	0,78	0,94	44,15	0,20	-0,38	0,99
Al ³⁺	cmol _c kg ⁻¹	8,67	-0,42	-1,31	0,86	23,32	-0,11	2,26	0,93
H+Al	cmol _c kg ⁻¹	14,14	-0,08	-1,31	0,94	9,38	0,79	-1,34	0,79
K ⁺	cmol _c kg ⁻¹	32,67	0,67	-0,03	0,92	42,85	1,90	4,33	0,82
Ca ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	11,81	0,33	0,99	0,95	12,74	-0,64	2,21	0,90
Mg ²⁺	cmol _c kg ⁻¹	7,92	-0,89	0,96	0,94	20,34	-2,40	6,00	0,66
CTC	cmol _c kg ⁻¹	11,50	0,00	-1,42	0,94	9,33	0,78	-1,35	0,79
V	%	13,08	0,66	-0,94	0,89	16,43	-1,28	2,54	0,89

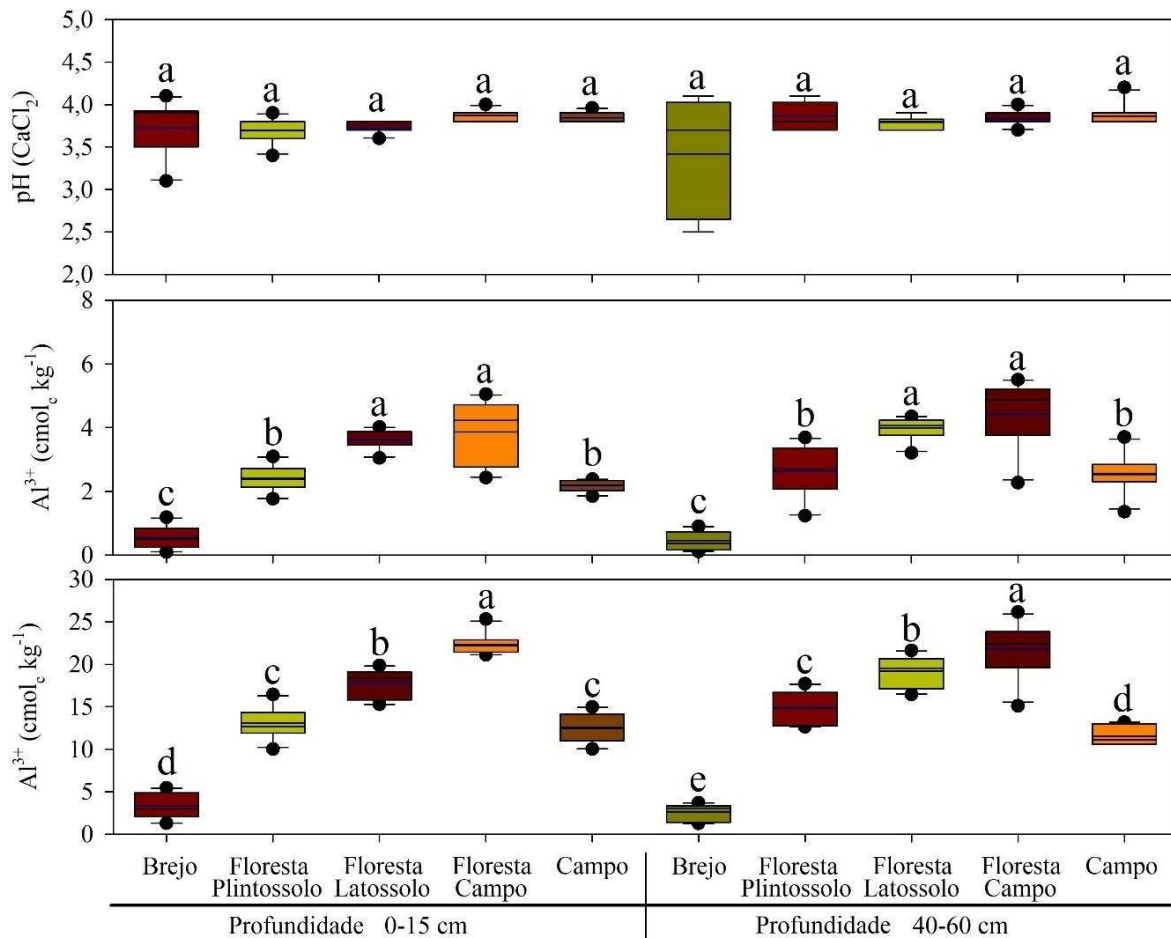


Figura 10- Boxplot e teste de média do pH, Al³⁺ e carbono do solo em diferentes ambientes e profundidades no Parque Nacional Mapinguari. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.

Os valores de pH foram relativamente baixos em todos os ambientes, variando entre 3,7 e 4,5, indicando uma acidez generalizada. Contudo, os maiores teores de alumínio trocável (Al^{3+}) e acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$) foram observados na Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico), especialmente na profundidade de 40–60 cm, com valores médios superiores a $3,5 \text{ cmolc kg}^{-1}$. Essa condição de elevada acidez representa um fator limitante à absorção de nutrientes e ao desenvolvimento radicular, afetando a função do solo como suporte ao crescimento vegetal e regulador químico.

Em contraste, os solos sob Latossolo (Floresta densa Latossolo) apresentaram os menores valores de Al^{3+} e $\text{H}^+ + \text{Al}$, indicando uma condição menos ácida e mais estável, ainda que associada a uma menor fertilidade natural. O campo natural (Gleissolo) apresentou uma combinação de alta acidez com variabilidade acentuada, o que pode dificultar a gestão ou a previsão de seu comportamento químico.

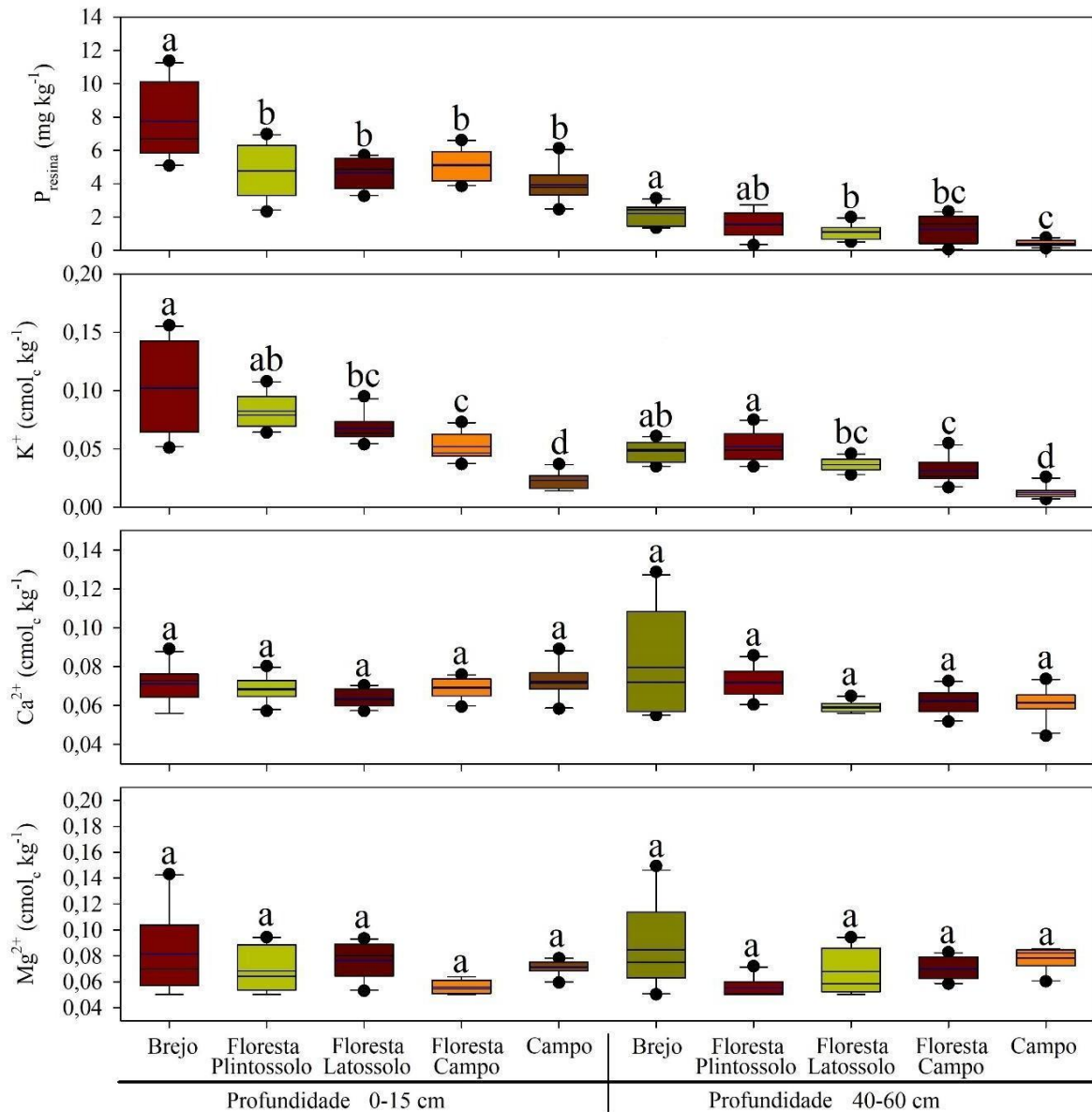


Figura 11- Boxplot e teste de média para os atributos químicos do solo (P, K⁺, Ca²⁺ e Mg²⁺) em diferentes ambientes no Parque Nacional Mapinguari. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.

O fósforo (P) disponível, nutriente chave para a produtividade primária, apresentou alta variabilidade entre os ambientes e, sobretudo, com a profundidade. Os maiores valores foram detectados no campo natural (Gleissolo) e no Cambissolo (Zona de transição floresta-campo) na camada de 40–60 cm, alcançando até 14 mg kg^{-1} . Isso pode estar relacionado à mobilidade vertical, deposição superficial ou aporte de matéria orgânica. Nas áreas florestais, especialmente na floresta de inundação (Neossolo Flúvico) e no Latossolo, (Floresta densa Latossolo) os valores de fósforo (P) foram os mais baixos.

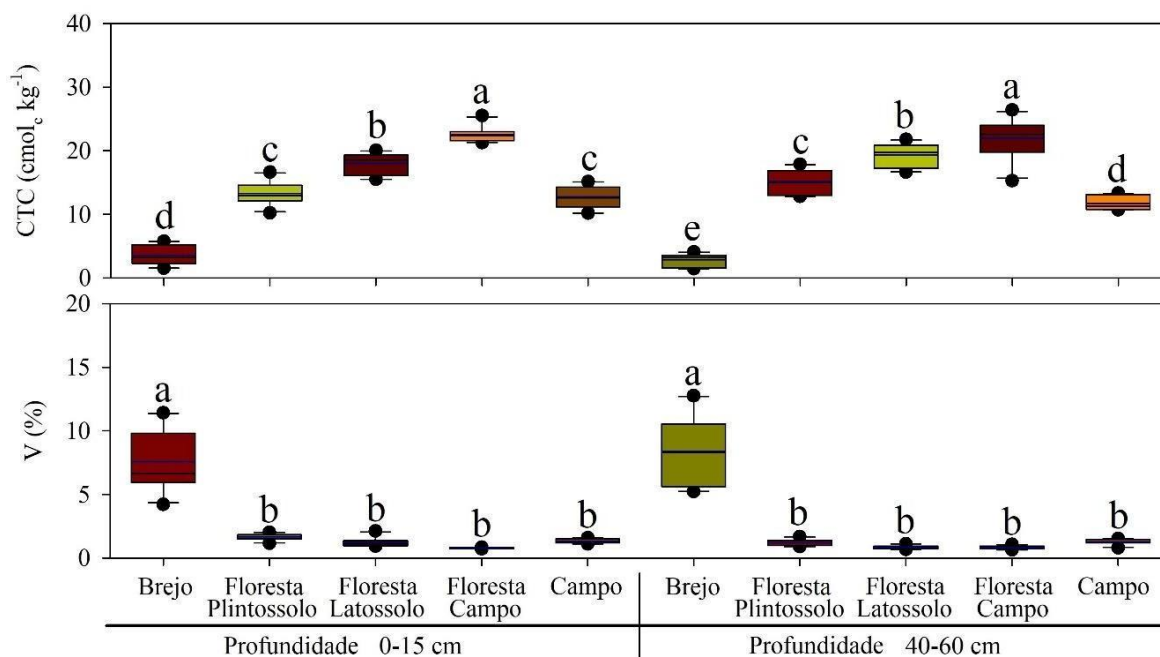


Figura 12- Boxplot e teste de média da capacidade de troca catiônica (CTC) e da saturação por bases (V%) do solo em diferentes ambientes no Parque Nacional Mapinguari. Letras minúsculas diferentes em cada profundidade indicam diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5%.

A CTC, (capacidade de troca de cátions) que expressa a capacidade do solo em reter e disponibilizar nutrientes, foi significativamente maior na Floresta de Inundação, reflexo direto da acidez elevada e da presença de Al^{3+} e $\text{H}^+ + \text{Al}$. Entretanto, a saturação por bases (V%) nesse ambiente foi baixa, reforçando sua baixa fertilidade efetiva. Por outro lado, nos ambientes de transição (Cambissolo) e Campo natural (Gleissolo), apesar da variabilidade, observaram-se maiores valores de SB (soma de bases) e V%, (saturação por bases) especialmente em profundidade. Isso pode indicar uma maior fertilidade química relativa, ainda que acompanhada de elevada acidez e desequilíbrio entre cátions. A (Floresta densa Latossolo), por sua vez, apresentou os menores valores de CTC e SB, refletindo um solo quimicamente pobre, mas quimicamente estável.

8. DISCUSSÃO

8.1 Efeito dos ambientes nos atributos do solo

Os ambientes avaliados apresentaram diferenças nos atributos químicos e físicos do solo. A alta proporção de agregados maiores (>2 mm) nas áreas amostradas, conforme destacado por Freitas, Fonseca e Figueiredo (2022), sugere que, nesses ambientes de florestas, o solo possui uma estrutura mais consolidada. Na profundidade de 0–15 cm, os solos florestais apresentaram maior teor de matéria orgânica do solo (MOS), carbono orgânico do solo (COS) e estoque de carbono (ECS), o que corrobora os estudos de Giácomo et al. (2015). Em contraste, o Campo Natural (Gleissolo) apresentou menor densidade do solo (Ds) e maiores valores de porosidade total (PT), favorecendo a infiltração de água e a aeração.

Parte desse comportamento pode ser explicada pelo fato de as áreas amostradas estarem inseridas em ambientes naturais pouco ou muito pouco antropizados, o que favorece a formação de agregados maiores, resultante da interação entre raízes e matéria orgânica. Entretanto, na profundidade de 40–60 cm, embora os valores tenham diminuído, os solos florestais mantiveram superioridade em relação ao campo natural, confirmando a influência positiva da vegetação densa na qualidade do solo em diferentes camadas.

De modo geral, os ambientes com vegetação densa, maior acúmulo de matéria orgânica e textura predominantemente argilosa apresentaram melhores condições de estrutura física e química. Contudo, a acidez elevada e a presença de alumínio trocável (Al^{3+}) ainda representaram limitações em alguns desses solos. A integração dos dados mostra que atributos como densidade, porosidade, capacidade de troca de cátions (CTC), pH, fósforo (P) e Al^{3+} estão inter-relacionados e condicionam a capacidade do solo em prover serviços ecossistêmicos, como suporte à vegetação, retenção de água, ciclagem de nutrientes e armazenamento de carbono.

A Resistência do Solo à Penetração (RSP) é um parâmetro crucial para avaliar a compactação, sendo influenciada por fatores como textura, teor de argila, umidade e densidade. No presente estudo, observou-se que na Floresta densa (Latossolo), mesmo a 0–15 cm, a RSP foi mais elevada, contrastando com a literatura, que sugere que a vegetação florestal tende a reduzir a resistência do solo. Por outro lado, no Campo Natural (Gleissolo), onde seriam esperados maiores valores de RSP

(Lourenço et al., 2018), foram encontrados menores valores, mesmo com textura mais arenosa. Esse comportamento pode estar relacionado à elevada umidade, bem como aos maiores teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} , que favorecem a floculação da argila e melhoram a estrutura física (Cunha et al., 2011).

A relação entre textura e estabilidade estrutural foi estudada, sobretudo nos solos latossólicos, que favorecem a formação de agregados bem estruturados e a criação de macroporos, já que esses solos não se compactam com facilidade, promovendo maior aeração e infiltração (Soinne et al., 2023). Entretanto, nossos dados sugerem que outros fatores podem estar desempenhando papel significativo na estabilidade dos agregados, especialmente porque a Floresta densa (Latossolo) apresentou menor proporção de agregados maiores em relação aos demais ambientes. Isso indica que fatores como acidez e disponibilidade de cátions básicos podem estar afetando negativamente a estrutura física.

As diferenças texturais entre os solos, acentuadamente no ambiente de Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico), podem estar relacionadas à instabilidade desse ambiente. Segundo Lo et al. (2022), esse comportamento é esperado em regiões alagadiças ou sujeitas a inundações, devido ao maior carreamento de partículas finas, o que explica as diferenças significativas nos teores de silte, areia e argila em relação aos demais ambientes.

Nos ambientes com características hidromórficas, como a Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico) e o Campo Natural (Gleissolo), a 0–15 cm, observou-se menor densidade do solo e maior umidade gravimétrica (U_g), como esperado para solos sujeitos à saturação periódica por água. Esses ambientes também apresentaram os maiores teores de Al^{3+} e acidez potencial ($\text{H}^+ + \text{Al}$), refletindo em valores elevados de CTC, mas com baixa saturação por bases ($V\%$), o que limita a fertilidade efetiva. De acordo com Novais et al. (2007) e Rahman et al. (2024), em solos com alta acidez, o Al^{3+} compete com nutrientes na solução, prejudicando sua absorção e limitando o crescimento radicular.

O comportamento da porosidade entre os ambientes, sobretudo da porosidade total (PT) e microporosidade (MiP), parece estar diretamente relacionado à Ds. Solos menos densos tendem a apresentar maior saturação de água nos microporos. Esse padrão está associado à estrutura física e à presença de minerais 2:1, frequentemente encontrados em ambientes de campo natural, que contribuem para maior microporosidade. Estudos adicionais sobre o material de origem são necessários para

compreender melhor esse comportamento.

Os ambientes de Cambissolo e Gleissolo destacaram-se quimicamente pelos maiores valores de soma de bases (SB), Ca^{2+} e Mg^{2+} , especialmente na camada de 40–60 cm. Nessas áreas, observou-se ainda maior variabilidade nos teores de fósforo disponível, alcançando até 14 mg kg^{-1} no Gleissolo. Esse comportamento pode estar associado ao acúmulo superficial, à mobilidade vertical ou à dinâmica da decomposição da matéria orgânica, conforme Bartoszek et al. (2023), que destacam a influência da MOS na redistribuição do fósforo em solos e sedimentos. Em contraste, os ambientes de Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico) e Floresta densa (Latossolo), que poderiam apresentar maiores valores de P devido ao acúmulo de MOS, mostraram os menores teores, o que compromete a produção primária e a ciclagem de nutrientes (Moreira; Siqueira, 2006).

O pH foi menos ácido nos solos florestais em ambas as profundidades. Embora a decomposição da MOS libere ácidos orgânicos que tendem a reduzir o pH (Killham, 1994), nos ambientes florestais avaliados esse efeito parece ter sido contrabalançado pela maior saturação por bases, resultando em menor acidez em comparação aos campos naturais. Nos Gleissolos, verificaram-se maiores valores de $\text{H}^+ + \text{Al}$ e Al^{3+} , associados à baixa fertilidade. Segundo Minhas et al. (2007), a qualidade da água de irrigação ou a presença de sais dissolvidos pode alterar o pH do solo, o que, aliado à acidez natural, contribui para restrições ao desenvolvimento vegetal.

A formação de grupos com diferenças significativas em Ds e Ug sugere forte relação desses atributos com a vegetação, material de origem e relevo, o que explica a separação em três agrupamentos: (a) Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico) e Campo Natural (Gleissolo); (b) Floresta densa (Plintossolo) e Floresta densa (Latossolo); e (c) Zona de Transição Floresta/Campo (Cambissolo). Esses resultados corroboram Campos et al. (2012), que observaram em topossequências amazônicas diferenças de atributos edáficos diretamente relacionadas ao relevo.

No ambiente de Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico), destacaram-se valores elevados de CTC e saturação por bases, porém acompanhados de altas concentrações de Al^{3+} . Essa condição hidromórfica, com alta disponibilidade de solução, favorece a lixiviação de ânions, como o fósforo, pela competição com íons de alumínio. Assim, mesmo com CTC elevada, esse ambiente torna-se quimicamente restritivo ao desenvolvimento vegetal. Tal contradição entre cargas disponíveis e baixa

fertilidade evidencia a complexidade da dinâmica edáfica em ambientes encharcados.

De modo geral, os solos florestais apresentaram condições físicas e químicas mais favoráveis em ambas as profundidades, confirmando a hipótese de que esses ambientes oferecem maior suporte à vegetação, melhor regulação hídrica e maior estoque de carbono. Em contrapartida, os campos naturais, embora apresentem menor Ds e maior microporosidade, possuem forte limitação química, com altos valores de acidez e Al^{3+} , reduzindo sua capacidade de sustentação da ciclagem de nutrientes. Essa integração de resultados evidencia a importância dos ambientes florestais para a manutenção dos serviços ecossistêmicos no Parque Nacional do Mapinguari.

8.2. Interação entre os ambientes e os atributos do solo

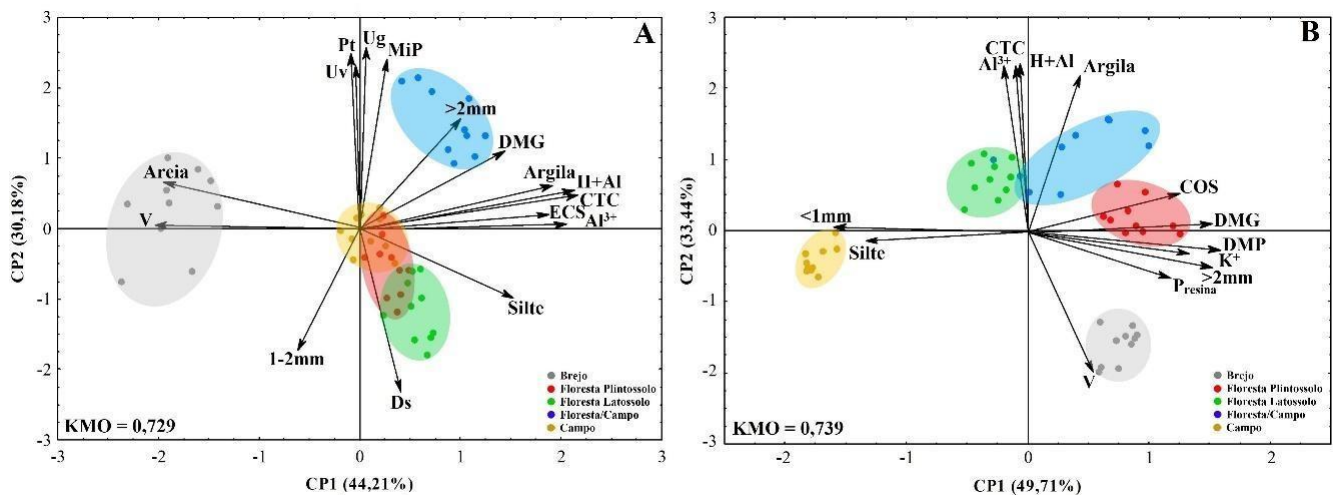


Figura 13- Plano fatorial dos atributos físico e químico do solo em diferentes ambientes, no Parque Nacional Mapinguari.

A formação de cinco grupos distintos observada nas análises multivariadas evidencia que cada um dos ambientes estudados apresenta condições edáficas próprias, principalmente na camada superficial do solo. Isso reflete a diversidade de condições edáficas, vegetação, relevo e material de origem típicas desse tipo de topossequência (Campos et al., 2012). Assim, a análise multivariada é uma ferramenta importante para simplificar e reduzir a complexidade da interpretação dos dados, ajudando a identificar quais variáveis têm maior peso, como demonstrado por Mota et al. (2014).

Os atributos físicos se comportaram de modo consistente com a literatura,

embora apresentem divergências em relação aos testes de comparação de médias. Enquanto a ACP revelou relações inversamente proporcionais entre a estabilidade de agregados menores (<1 mm) e os teores de carbono orgânico do solo (COS), os testes de média não indicaram diferenças significativas entre os ambientes exceto na área de transição Floresta/Campo (Cambissolo). Essa divergência reforça o potencial da análise multivariada em capturar interações complexas entre variáveis que não são evidenciadas por análises univariadas.

A relação inversamente proporcional entre a densidade do solo (Ds) e atributos como umidade gravimétrica (Ug), umidade volumétrica (Uv), porosidade total (Pt) e microporosidade (MiP) é consistente com o papel desses indicadores na estruturação do solo. A literatura destaca que o monitoramento contínuo da Ds é essencial, uma vez que seu aumento compromete diretamente a porosidade e, consequentemente, a disponibilidade de água e oxigênio às raízes, exigindo manejo diferenciado em ambientes agrícolas (Carmo et al., 2018; Tavares da Silva et al., 2012).

As áreas de floresta densa latossolo e campo natural (Cambissolo) com maior proporção de agregados com diâmetro superior a 2mm com maiores com elevado DMG o que confirma uma estabilidade dos agregados, tendo maior porosidade, maior permeabilidade e maior atividade biológica, com maior potencial de sustentar processos ecológicos e de oferecer serviços ecossistêmicos de regulação e suporte.

Ainda que a área de estudo seja caracterizada por baixa ou nenhuma antropização, o avanço do arco do desmatamento na região (Carvalho & Domingues, 2016) e o potencial para expansão agrícola em ambientes de Campo natural (Gleissolo) e de Zona de transição floresta/campo natural (Cambissolo) (Lourenço et al., 2018) reforçam a relevância deste estudo. Os resultados obtidos oferecem valores de referência importantes para futuras comparações em cenários de uso e ocupação do solo, permitindo avaliar alterações nos serviços ecossistêmicos decorrentes da antropização (Souza et al., 2024).

As variáveis químicas, como a CTC (capacidade de troca de cátions), apresentaram maior potencial no ambiente de Florestas, indicando maior retenção de nutrientes e, consequentemente, maior capacidade de tamponamento da acidez. Observou-se também elevação nos teores de $H+Al$ (acidez potencial) e de Al^{3+} (alumínio trocável), evidenciando que esses solos apresentam acidez capaz de restringir a disponibilidade de nutrientes essenciais, como Ca, Mg e P. Além disso, o teor de argila foi determinante na segregação das amostras dos ambientes florestais,

revelando elevada fertilidade potencial e maior complexidade química nesses solos.

No ambiente de Floresta de inundação (Neossolo Flúvico), verificaram-se maiores valores de carbono orgânico do solo (COS), acompanhados pela predominância de agregados menores e por baixa fertilidade. Essa característica está associada às condições de elevada umidade, que favorecem o acúmulo de matéria orgânica, mas limitam sua mineralização. Já os solos de Floresta densa Plintossolo e as áreas de transição apresentaram valores intermediários de potássio (K^+), matéria orgânica (resina) e agregados estruturais, evidenciando o papel desses ambientes no gradiente textural e químico observado.

8.2. Serviços ecossistêmicos do solo

Os solos estudados no Parque Nacional Mapinguari revelam um grande potencial na oferta de serviços ecossistêmicos, especialmente aqueles relacionados à regulação do ciclo da água, suporte à vegetação, captura de carbono e circulação de nutrientes. A conexão entre características físicas, como porosidade e densidade, e químicas, como pH, capacidade de troca catiônica (CTC) e matéria orgânica, destaca a função dos solos em assegurar estabilidade e sustentabilidade ambiental nas diversas paisagens analisadas.

Solos com boa estrutura, principalmente os que possuem maiores concentrações de argila e matéria orgânica, como os encontrados na Floresta densa (Plintossolo) apresentam alta capacidade de retenção de água, maior absorção de nutrientes e potencial para armazenar carbono (Tavares da Silva et al., 2012; Bronick e Lal, 2005). Essa característica favorece o serviço de suporte, ao preservar a integridade do ecossistema, proporcionando condições adequadas para o crescimento das raízes e a atividade microbiológica (Soinne et al., 2023).

As zonas hidromórficas, como a Floresta de Inundação (Neossolo Flúvico) proporcionam serviços essenciais de regulação, contribuindo para o controle de enchentes, purificação hídrica, retenção de nutrientes e modulação do clima local (Costanza et al., 1998; Reid, 2005). Contudo, nossos dados mostram que a alta concentração de Al^{3+} nessas regiões, mesmo com elevada CTC, pode limitar a fertilidade real, impactando o serviço de provisão, especialmente na produtividade das plantas. Ademais, essas áreas alagadiças funcionam como sumidouros ou emissores de gases de efeito estufa (GEE), dependendo das condições ambientais e do manejo

adotado. A saturação hídrica favorece a geração de metano (CH_4), devido à restrição de oxigênio, ao passo que pode também promover a retenção de carbono no solo (Lipczynska-Kochany, 2018; Mello et al., 2024).

Solos com maior diversidade estrutural e estabilidade de agregados favorecem a resiliência dos ecossistemas, ampliando a capacidade de suporte a microrganismos benéficos e promovendo uma ciclagem eficiente de nutrientes. Essa condição representa um importante serviço de suporte ecológico, essencial à manutenção da biodiversidade e do equilíbrio funcional dos sistemas naturais (Soinne et al., 2023). Embora os resultados apresentados ofereçam subsídios relevantes para a compreensão do papel dos solos nos serviços ecossistêmicos da região, destaca-se a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a influência da vegetação, relevo e material de origem nesses processos (Reygadas, Spera e Salisbury, 2023; Siegel et al., 2024).

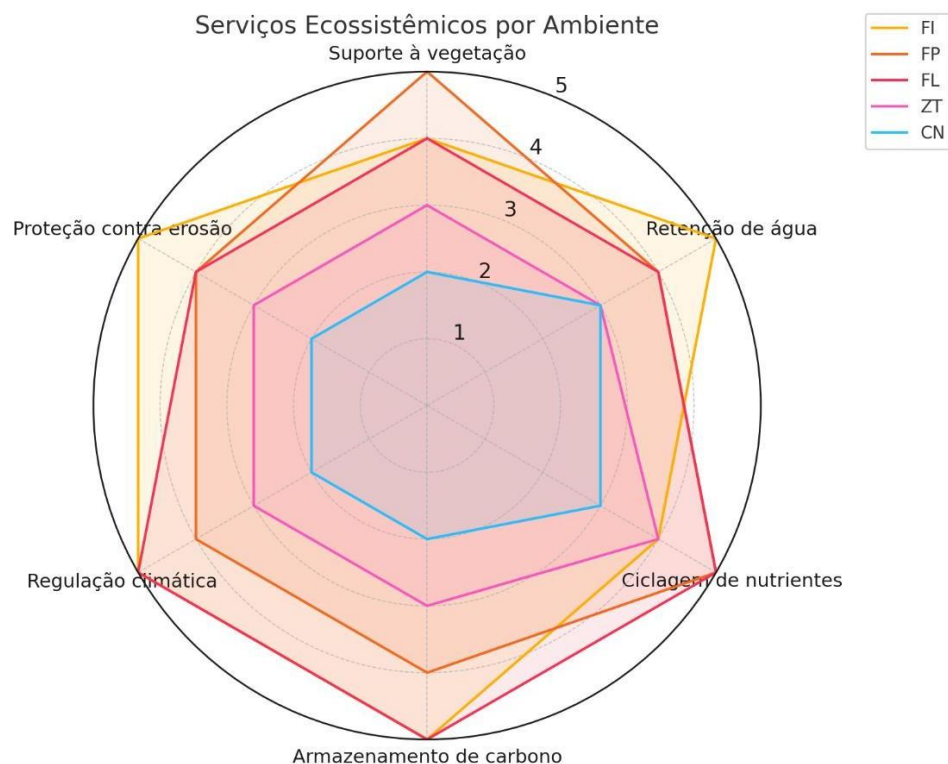


Figura 14-Serviços ecossistêmicos por ambiente.

9. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou que os atributos físicos e químicos dos solos do Parque Nacional do Mapinguari estão diretamente associados à sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais. Os resultados indicaram variações significativas entre os ambientes, sendo que os solos florestais especialmente os classificados como Plintossolos e Latossolos apresentaram maior estabilidade de agregados, menor densidade, maior porosidade e maiores teores de carbono orgânico, características que constituem indicadores chave da qualidade e funcionalidade do solo. Esses atributos favorecem a retenção de água, a ciclagem de nutrientes e o sequestro de carbono, reforçando os serviços de regulação e suporte proporcionados pelos ecossistemas florestais.

Em contraste, os solos de campos naturais e de áreas de transição apresentaram maior densidade e menores teores de matéria orgânica e carbono, refletindo menor estabilidade estrutural e fertilidade, mas mantendo funções hidrológicas relevantes, associadas à infiltração e ao armazenamento de água. A Análise de Componentes Principais (PCA) confirmou que atributos como textura, agregação, porosidade e carbono orgânico foram os principais fatores discriminantes entre os ambientes estudados.

De forma geral, os resultados evidenciam a forte influência da cobertura vegetal e do tipo de solo na manutenção das funções ecossistêmicas, indicando que os ambientes florestais contribuem de forma mais efetiva para os serviços ecossistêmicos do solo. Esses achados fornecem subsídios técnicos para a implementação de estratégias de conservação e manejo voltadas à preservação da integridade ecológica e da funcionalidade dos solos no Parque Nacional do Mapinguari e em ecossistemas amazônicos semelhantes.

10. REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, K.; HARTEMINK, A. E. Linking soils to ecosystem services - A global review. **Geoderma**, v. 262, p. 101–111, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.08.009>.
- ALVES PESSÔA, A.; VIEGAS, V. R.; FELIPE, E.; CARDOSO, S.; DA, G.; FRANCO, S. The Impacts of Sustainability on Health Promotion: **A Bibliographick Review. PsiPro Journal**, v. 2, n. 2, p. 1–15, 2023.
- ANDRADE, A. dos S. C.; PEREIRA, R. A.; SALVIO, M. M. G.; JUNIOR, S. J. W. **Conflitos** Fundiários em Unidades de Conservação: Estudo de Caso da Parte Baixa do Parque Nacional do Itatiaia. **Biodiversidade Brasileira - BioBrasil**, v. 13, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.37002/biobrasil.v13i1.2307>
- BARTOSZEK, L.; KOWALCZYK, W.; BARTOSZEK, M.; SZWARCZYŃSKA, N.; PAWLIK, M.** The effect of natural organic matter (NOM) on the distribution and resources of mobile phosphorus in the bottom sediments of small retention reservoirs. *Aquatic Sciences*, Cham: Springer, v. 85, n. 107, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00027-023-01003-4>. Acesso em: 29 jul. 2025.
- BRANDER, L. M.; GROOT, R.; SCHÄGNER, J. P.; GUISADO-GOÑI, V.; VAN'T HOFF, V.; SOLOMINIDES, S. The role of forest ecosystem services to support the green recovery. 1. ed. Rome:
- FAO**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc7151en> BRONICK, C. J.; LAL, R. *Soil structure and management: A review. Geoderma*, v. 124, n. 1–2, p. 3–22, 2005. DOI: 10.1016/j.Geoderma.2004.03.005.
- SCHAEFER, C. E. G. R.; CAMPOS, P. V.; CÂNDIDO, H. G.; CORRÊA, G. R.; FARIA, R. M.; VALE JUNIOR, J. F. *Serras e pantanais arenosos: solos e geoambientes em unidade de conservação da Amazônia, Brasil. Neotropical Biology and Conservation*, v. 15, n. 1, p. 43–69, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3897/neotropical.15.e49221>.
- CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R. SOUZA JÚNIOR, V. S.; ROSAS, M. R.; ALMEIDA, M. C. *Topossequência de solos na transição campos naturais–floresta na região de Humaitá, Amazonas. Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 42, n. 3, p. 387–398, 2018.
- CARMO, M.; CUNICO, J.; SANTOS, M.; SILVA, P.; SIQUEIRA, M. Densidade e Porosidade do Solo em Pastagem Recuperada e Degradada, da Amazônia Ocidental. **Agrarian Academy**, v. 5, n. 9, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.18677/agrarian_academy_2018a15
- CARVALHO, T. S.; DOMINGUES, E. P. Projeção de um cenário econômico e de desmatamento para a Amazônia Legal Brasileira entre 2006 e 2030. **Nova Economia**, v. 26, n. 2, p. 585–621, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0103-6351/2665>

CENTENO, L. N.; GUEVARA, F.; SOUSA, R. O. D.; TIMM, L. C. The use of questionnaires for assessment of customer's needs in seeds laboratories. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31, 2017. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/RBES/>

CHERUBIN, M. R.; SCHIEBELBEIN, B. E. Saúde do solo: múltiplas perspectivas e percepções. 1. ed. Piracicaba: ESALQ-USP, 2022. E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786587391342>

COSTA, A. M.; MOURA, M. S.; NAVARRO, I. F.; DA SILVA, V. C.; PISSARRA, T. C. T.; VALERA, C. A.; FERNANDES, L. F. S.; PACHECO, F. A. L. Ecosystem services potential and soil conservation policies with emphasis on degraded pastures in Brazil. **Geography and Sustainability**, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2024.07.010>

COSTA, T. L. S. R.; MAZZOCHINI, G. G.; OLIVEIRA-FILHO, A. T.; GANADE, G.; CARVALHO, A. R.; MANHÃES, A. P. Priority areas for restoring ecosystem services to enhance human well-being in a dry forest. **Restoration Ecology**, v. 29, n. 7, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/rec.13426>

COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, Rudolf; FARBER, S.; GRASSO, M.; HANNON, B.; LIMBURG, K.; NAEEM, S.; O'NEILL, R. V.; PARUELO, J.; RASKIN, R. G.; SUTTON, P.; VAN DEN B, M. *The value of the world's ecosystem services and natural capital.* **Nature**, v. 387, p. 253–260, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/387253a0>. Acesso em: 13 jul. 2025.

COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; BRAAT, L.; KUBISZEWSKI, I.; FIORAMONTI, L.; SUTTON, P.; FARBER, S.; GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? **Ecosystem Services**, v. 28, p. 1–16, 2017 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>

CUNHA, J. C. da; OLIVEIRA, G. C. de; KER, J. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo na região dos cerrados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1669–1678, 2011. DOI: 10.159/S0100-06832011000500028.

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858–1868, 2010 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>

DORAN, J. W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M. A. Soil Health and Sustainability. **Advances in Agronomy**, v. 56, 1996. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60178-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60178-9) DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. *Defining soil quality for a sustainable environment.* In: PANKHURST, C.; DOUBE, B.; GUPTA, V. (ed.). **Biological indicators of soil health.** Wallingford: CAB International, 1994. p. 1–28.

EHRlich, P. R.; MOONEY, H. A. Extinction, Substitution, and Ecosystem Services. **BioScience**, v. 33, n. 4, p. 248–254, 1983.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The role of forest ecosystem services to support the green recovery: Evidence from the Ecosystem Services Valuation Database. Rome: FAO, 2023. (**FAO Forestry Working Paper**, No. 38). Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc7151en>. Acesso em: 16 abr.2025.

FERREIRA, Carla S. S. et al. **Wetlands as nature-based solutions for water management in different environments**. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 33, p. 100476, June 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100476>.

FREITAS, D. A.; FONSECA, F.; FIGUEIREDO, T. de. Estabilidade da agregação: indicador da qualidade do solo de grande relevância nas decisões quanto ao uso e ao manejo do solo. **Studies in Environmental and Animal Sciences**, v. 3, n. 3, p. 1508–1520, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.54020/seasv3n3-016>

JENNY, H. **Factors of soil formation: A System of Quantitative Pedology**. Dover Publications McGraw-Hill, New York, 1941. 281 p.

GIÁCOMO, R. G.; PEREIRA, M. G.; GUARESCHI, R. F.; MACHADO, D. L. **Atributos químicos e físicos do solo, estoques de carbono e nitrogênio e frações húmicas em diferentes formações vegetais**. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 617-631, jul.-set. 2015. DOI: 10.5902/1980509832751.

LIPCZYNSKA-KOCHANY, E. Effect of climate change on humic substances and associated impacts on the quality of surface water and groundwater: A review. *Science of the Total Environment*, v. 640–641, p. 1548–1565, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.376>

LO, E. L.; YEAGER, K. M.; BERGIER, I.; DOMINGOS-LUZ, L.; SILVA, A.; MCGLUE, M. M. Sediment Infill of Tropical Floodplain Lakes: Rates, Controls, and Implications for Ecosystem Services. **Frontiers in Earth Science**, v. 10, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2022.875919>

LOPES, R. V. P.; TEJERINA-GARRO, F. L.; LEITE, J. C.; NASCIMENTO, M. H. R.; NASCIMENTO, A. S. do. Assessing the Degree of Sustainability in Extractive Reserves in the Amazon Biome Using the Fuzzy Logic Tool for Decision Making. **Sustainability (Switzerland)**, v. 16, n. 8, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16083279>

LOURENÇO, I. H.; CAMPOS, M. C. C.; COUTINHO ALHO, L.; CUNHA, J. M.; MANTOVANELI, B.; SILVA, D. M. P. **Spatial dependence of soil attributes in natural field and forest areas**, Humaitá, AM. *Acta Iguazu*, v. 7, n. 5, p. 92–108, 2018.

MARTINS, P. A. da S.; QUERINO, C. A. dos S.; QUERINO, J. K. A. da S.; MOURA, M. A. L.; NUNES, D. D.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. **Updating of the Köppen and Thornthwaite and Mather (1955) climate classification system for the Southern Amazonas**. *Geography Department University of Sao Paulo*, v. 43, p. e191137, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/eissn.2236-2878.rdg.2023.191137>

MELLO, F. A. O.; FERREIRA, T. O.; BERNARDINO, A. F.; QUEIROZ, H. M.; MELLO, D. C.; MENILLO, R. B.; CHERUBIN, M. R. **Soil Health and Ecosystem Services in Mangrove Forests: A Global Overview**. Water (Switzerland), v. 16, n. 24, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w16243626>

MINHAS, P. S.; DUBEY, S. K.; SHARMA, D. R. Effects on soil and paddy–wheat crops irrigated with waters containing residual alkalinity. *Soil Use and Management*, v. 23, n. 3, p. 254-261, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2007.00090>.

MOTA, J. C. A.; ALVES, C. V. O.; FREIRE, A. G.; ASSIS JÚNIOR, R. N. Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau – CE, Brazil. *Soil and Tillage Research*, [S.l.], v. 140, p. 66-73, 2014

OLIVEIRA, M. S.; MENEZES, J. A.; PATRÍCIO, J.; S; FROZZI, J.; GOMES, J. M. **Variabilidade Temporal do Efluxo de CO₂ em Áreas de Floresta Secundária e Campo Natural na Região Sudoeste da Amazônia**. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 16, n. 3, p. 1466–1480, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>

QU, X.; LI, X.; BARDGETT, R. D.; KUZYAKOV, Y.; REVILLINI, D.; ET AL.; DELGADO-BAQUERIZO, M. Deforestation impacts soil biodiversity and ecosystem services worldwide. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 121, n. 13, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.2318475121>

RAHMAN, Shafeeq Ur; HAN, Jing-Cheng; AHMAD, Muhammad; ASHRAF, Muhammad Nadeem; KHALIQ, Muhammad Athar; YOUSAF, Maryam; WANG, Yuchen; YASIN, Ghulam; NAWAZ, Muhammad Farrakh; KHAN, Khalid Ali; DU, Zhenjie. *Aluminum phytotoxicity in acidic environments: A comprehensive review of plant tolerance and adaptation strategies*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, [S.l.], v. 269, p. 115791, 1 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115791>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0147651323012952>.

REID, W. V. . Ecosystems and human well-being : synthesis : a report of the Millennium Ecosystem Assessment. Washington, DC: Island Press, 2005.

REYGADAS, Y.; SPERA, S. A.; SALISBURY, D. S. Effects of deforestation and forest degradation on ecosystem service indicators across the Southwestern Amazon. **Ecological Indicators**, v. 147, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.109996>

RODRIGUES, A. F. *et al.* Systematic review of soil ecosystem services in tropical regions. [S. l.]: **Royal Society Publishing**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rsos.201584>

RODRIGUES, J. C. W.; CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, M. de N. S. da; LIMA, R. A.; SANTOS, R. V. dos. A Importância da Produção de Mudanças de Essências Florestais na Região Amazônica: Uma Revisão Sistemática. **Revista Científica FAEMA**, v. 14, n. 1, p. 10–24, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.31072/rcf.v14i1.1144>

ROMERO, F.; LABOUYRIE, M.; ORGIAZZI, A.; BALLABIO, C.; PANAGOS, P.; ET AL; VAN DER HEIJDEN, M. G. A. Soil health increases primary productivity across Europe. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1101/2023.10.29.564603>

SANCHES, G. K.; SALVIANO, O. S.; BRAGA, I. G.; ADJERAN, O. K. J.; TAVARES, R. K.; JUNIOR, A. F. N.; LIMA, H. N. Caracterização de solos arenosos em Campinaranas da região metropolitana de Manaus, Amazonas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 594– 608, 2024.

SIEGEL, T.; MAGRACH, A.; LAURANCE, W. F.; LUTHER, D. A global meta-analysis of the impacts of forest fragmentation on biotic mutualisms and antagonisms. **Conservation Biology**, v. 38, n. 3, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/cobi.14206>

SILVA, A. J. B.; SOUZA, M. C. S. A. Políticas ambientais acerca das unidades de conservação no Brasil: desafios das gestões e políticas das áreas protegidas. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 15, n. 1, p. 1012–1031, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.7769/gesec.v15i1.3400>

SILVA, M. O.; SANTOS, M. P.; SOUSA, A. C. da P.; SILVA, R. L. V.; MOURA, I. A. A.; SILVA, R. S.; COSTA, K. D. S. Qualidade do Solo: Indicadores Biológicos para um Manejo Sustentável. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 6853–6875, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n1-463>

SOINNE, H.; KESKINEN, R.; TÄHTIKARHU, M.; KUVA, J.; HYVÄLUOMA, J. Effects of organic carbon and clay contents on structure-related properties of arable soils with high clay content. **European Journal of Soil Science**, v. 74, n. 5, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ejss.13424>

SOUZA, C. A.; JUNIOR, E. S. O.; HACON, S. S.; SOUZA, A.; HACON, S. Serviços ecossistêmicos da Amazônia Brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 178–198, 2024. Disponível em: <http://orcid.org/0000-0002-1161-9242>

SOUZA, J. J. L. L.; FONTES, M. P. F.; GILKES, R.; DA COSTA, L. M.; DE OLIVEIRA, T. S. Geochemical signature of Amazon tropical rainforest soils. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 42, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20170192>

TAVARES, SILV, C. A.; CESAR, T.; CEZAR, M.; HELENA, L.; NÓBREGA, P. Porosidade de Latossolos e Práticas de Manejo Agrícola para a Conservação do Solo. **Revista Varia Scientia Agrárias**, v. 2, n. 2, p. 153–164, 2012. <https://DOI:10.3390/ecologies4030036>

TELO, G, J. The Role of Soils in Sustainability, Climate Change, and Ecosystem Services: Challenges and Opportunities. **Ecologies**, v. 4, n. 3, p. 552–567, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ecologies4030036>

VALANI, G. P.; MARTÍNI, A. F.; PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. de C.; COOPER, M. Soil physical quality in the topsoil of integrated and non-integrated grazing systems in a Brazilian Ferralsol. **Soil and Tillage Research**, v. 220, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105357>

VALE, J. J. F.; LEITÃO, S. M. I.; NASCIMENTO, R. R. P. P.; RIBEIRO, D. N. R.; CRUZ, S. L. D. Solos da Amazônia: etnopedologia e desenvolvimento sustentável. **Revista Agro@ambiente**, v. 5, n. 2, p. 158–165, 2011. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v5i2.562>

VOGEL, H.-J.; AMELUNG, W.; BAUM, C.; BONKOWSKI, M.; BLAGODATSKY, S.; GROSCHE, R.; HERBST, M.; KIESE, R.; KOCH, S.; KUHWARD, M.; KÖNIG, S.; LEINWEBER, P.; LENNARTZ, B.; MÜLLER, C. W.; PAGEL, H.; RILLIG, M. C.; RÜSCHHOF, J.; RUSSELL, D.; SCHNEPF, A.; SCHULZ, S.; SIEBERS, N.; VETTERLEIN, D.; WACHENDORF, C.; WELLER, U.; WOLLSCHLÄGER, U. *How to adequately represent biological processes in modeling multifunctionality of arable soils. Biology and Fertility of Soils*, v. 60, p. 263–306, 2024. Publicado online em: 11 mar. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01802-3>.

bVOGEL, Hs-; EBERHARDT, E.; FRANKO, U.; LANG, B.; LIEß, M.; WELLER, U.; WIESMEIER, M.; WOLLSCHLÄGER, U. *Quantitative evaluation of soil functions: potential and state. Frontiers in Environmental Science*, [S.l.], v. 7, p. 164, 22 out. 2019. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00164.

VOGEL, H.-J.; BARTKE, S.; DAEDLOW, K.; HELMING, K.; KÖGEL-KNABNER, I.; LANG, B.; RABOT, Eva; R., D.; STÖBEL, B.; WELLER, U.; WIESMEIER, M.; WOLLSCHLÄGER, U. **A systemic approach for modeling soil functions. SOIL**, Katlenburg-Lindau, v. 4, n. 1, p. 83–92, 2018. DOI: 10.5194/soil-4-83-2018. Disponível em: <https://soil.copernicus.org/articles/4/83/2018/>. Acesso em: 10 jul. 2025.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil¹. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467–1476, 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

YOUNG, C. E. F.; MEDEIROS, R. Quanto vale o verde: a importância econômica das unidades de conservação brasileiras. Rio de Janeiro: **Conservação Internacional**, 2018.