



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LENNON DE OLIVEIRA SALES

**CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB SUCESSÃO NATURAL**

Prof. Dr. MARCOS GERVASIO PEREIRA
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
Dezembro de 2024



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

LENNON DE OLIVEIRA SALES

**CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB SUCESSÃO NATURAL**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Prof. Dr. MARCOS GERVASIO PEREIRA
Orientador

SEROPÉDICA, RJ
Dezembro de 2024

**CARACTERIZAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO EM
FRAGMENTOS FLORESTAIS SOB SUCESSÃO NATURAL**

LENNON DE OLIVEIRA SALES

APROVADA EM: 11/12/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Marcos Gervasio Pereira – UFRRJ
Orientador

Dr. Luiz Alberto da Silva Rodrigues Pinto - UFRRJ
Membro

Dr. Matheus Severo de Souza Kulmann - UFRRJ
Membro

AGRADECIMENTOS

Não podia começar sem agradecer a Deus por ter me guiado e me sustentado nessa jornada até aqui, a todos os meus Santos de devoção por intercederem por mim junto a Jesus.

A minha mãe, meu porto seguro, auxílio para todos os momentos, há quem a conheça e ame logo de primeira, há quem prefira a ela do que a mim, mas quem sou eu pra negar tal escolha? Inclusive, ela é mesmo a melhor. Mãe, sou um pouco de você, o melhor de você e comigo você estará por toda a vida.

A minha família mais que especial, bisa Ondina (in memorian), as minhas avós Magna e Maria, ao meu avô Vicente, aos meus tios Fabio e Martinha, Paulinho e Julia e a aos meus tios Fabiana e Zé, meus primos e também, seus familiares, todos me apoiaram e me animaram sempre mantendo minha chama acesa e uma pessoa mais que feliz, nos melhores e nos piores momentos, porque a vida é assim, nem todos os dias são de sol, mas há necessidade de doses, mesmo que pequenas, de luz.

Aos meus queridos amigos, que me fazem especial e me tornam uma pessoa melhor a cada dia, Ana Luzia, Diane, Alice, Bruna, Arthur, Beto, Fábio, Zé, Marcelo, Guilherme, Pedro, Karol, Ana Flávia, Bruno, Rodrigo, Carlos, Nath, Geovana, Mari, Marcelle, Juliana, Larissa, Taiza, Bia, Bruna, Isadora, Isabella ...haja gente também pra lembrar, amo todos vocês!

A minha equipe de amigos do laboratório, onde vivi momentos de aprendizado, descontração, muitos risos e sorrisos, Robert, Wanderson, Igor, Luiz, Mel, Camila, Renato, Deivid, Eduardo, Vitória, levo vocês comigo pra vida!

Ao meu grande mestre, Prof Marcos Gervasio Pereira, que como tal um jedi junto ao seu discípulo padawan, me acompanhou, me ensinou e se manteve presente durante toda minha trajetória acadêmica.

A Rural e Seropédica, que me receberam de braços abertos, há uma vida antes e após a Universidade.

“Eu sou o que me cerca. Se eu não preservar o que me cerca, eu não me preservo.”

José Ortega y Gasset

RESUMO

SALES, Lennon de Oliveira. **Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos florestais sob sucessão natural**. 2024. 21 f. Monografia. Instituto de Floresta, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha papel crucial na sustentabilidade dos ecossistemas e na manutenção da qualidade do solo. Este estudo investigou as frações da MOS como indicadores dos estágios sucessionais em fragmentos florestais do Vale do Paraíba, compreendendo os seguintes fragmentos: Arapeí, São José do Barreiro, Rio Claro, Floresta do Ingá, Floresta da Cicuta, Barra do Pirai, Bananal, Pirai. Foram coletadas e analisadas amostras de terra nas camadas de 0-10 e 10-20 cm, avaliando o carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP, fração lábil), carbono orgânico associado aos minerais (COam, fração estável), matéria orgânica leve (MOL), nitrogênio total (NT), relação C/N e substâncias húmicas - ácidos fúlvicos (CFAF), ácidos húmicos (CFAH) e humina (CHUM). Fragmentos em estágio mais avançado de sucessão, como Arapeí apresentaram maiores teores de frações estáveis, enquanto áreas em estágios iniciais mostraram predominância de frações lábeis. A relação C/N mostrou-se um importante indicador do histórico de uso, com valores menores em áreas de uso intensivo pretérito e valores mais elevados em áreas com menor interferência antrópica, refletindo diferentes níveis de preservação e recuperação do solo. Em profundidade, observou-se redução nos teores de COT e COP na maioria das áreas, exceto em Arapeí, onde a distribuição mais homogênea dessas frações sugere maior estabilidade do processo sucessional. A distribuição das frações húmicas refletiu diferentes trajetórias de recuperação pós-ciclo do café, com áreas em estágios mais avançados de sucessão apresentando maior proporção de frações estáveis. Os resultados confirmam que as frações da MOS podem ser utilizadas como indicadores eficientes dos processos sucessionais, fornecendo subsídios importantes para estratégias de conservação e restauração florestal específicas para cada área.

Palavras-chave: Carbono orgânico, serviços ecossistêmicos, qualidade do solo, degradação florestal.

ABSTRACT

SALES, Lennon de Oliveira. **Characterization of soil organic matter in forest fragments under natural succession**. 2024. 21 p. Monograph. Forestry Institute, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Soil organic matter (SOM) plays a crucial role in the sustainability of ecosystems and in maintaining soil quality. This study investigated MOS fractions as indicators of successional stages in forest fragments in the Paraíba Valley, comprising the following fragments: Arapeí, São José do Barreiro, Rio Claro, Floresta do Ingá, Floresta da Cicuta, Barra do Pirai, Bananal, Pirai. Soil samples were collected and analyzed in the 0-10 cm and 10-20 cm layers, assessing total organic carbon (TOC), particulate organic carbon (C_{Op}, labile fraction), organic carbon associated with minerals (C_{Oam}, stable fraction), light organic matter (MOL), total nitrogen (NT), C/N ratio and humic substances - fulvic acids (CFAF), humic acids (CFAH) and humin (CHUM). Fragments at a more advanced stage of succession, such as Arapeí, showed higher levels of stable fractions, while areas at an earlier stage showed a predominance of labile fractions. The C/N ratio proved to be an important indicator of the history of use, with lower values in areas of past intensive use and higher values in areas with less anthropogenic interference, reflecting different levels of soil preservation and recovery. At depth, there was a reduction in TOC and C_{Op} content in most areas, except in Arapeí, where the more homogeneous distribution of these fractions suggests greater stability in the successional process. The distribution of humic fractions reflected different recovery trajectories after the coffee cycle, with areas in more advanced stages of succession showing a higher proportion of stable fractions. The results confirm that MOS fractions can be used as efficient indicators of successional processes, providing important input for area-specific forest conservation and restoration strategies.

Keywords: Organic carbon, ecosystem services, soil quality, forest degradation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Transformações históricas da paisagem no Vale do Paraíba: impactos dos ciclos econômicos na cobertura florestal	2
2.2. Dinâmica da matéria orgânica e sucessão ecológica em ecossistemas tropicais do Vale do Paraíba	2
2.3. O papel do nitrogênio como indicador de sucessão ecológica	4
2.4. Influência da matéria orgânica do solo na estruturação e diversidade de comunidades florestais.....	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	5
3.1. Localização e características da área de estudo	5
3.2. Amostragem e coleta das amostras de terra.....	7
3.3. Fracionamento granulométrico da matéria orgânica e teores de carbono e nitrogênio do solo	7
3.4. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo	8
3.5. Análises estatísticas	8
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5. CONCLUSÃO.....	13
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	13
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1:** Esquema ilustrativo do processo de formação das substâncias húmicas no solo. Fonte: Adaptado de Stevenson, 1994. 3
- Figura 2:** Localização dos municípios das oito áreas estudadas e seus respectivos fragmentos no Vale do Paraíba, Brasil. Fonte: Adaptado com base em Souza (2021). 6
- Figura 3:** Teores de carbono orgânico das frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes fragmentos florestais do Vale do Paraíba (RJ/SP), região sudeste do Brasil. 11

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Localização e área amostrada dos fragmentos florestais estudados no Vale do Paraíba (SP/RJ), região sudeste do Brasil.	6
Tabela 2: Teores das frações da matéria orgânica do solo sob diferentes fragmentos florestais do Vale do Paraíba (RJ/SP), região sudeste do Brasil.	9

1. INTRODUÇÃO

O Vale do Paraíba, região que abrange os estados de São Paulo e Rio de Janeiro, representa um território marcado por transformações ambientais profundas, cujo processo histórico de ocupação e uso da terra alterou significativamente a paisagem da Mata Atlântica. A região possui uma complexa biogeografia influenciada pelos ciclos econômicos, especialmente o ciclo do café no século XIX, que provocou uma intensa conversão dos ecossistemas naturais (Souza, 2021).

Essa região apresenta um dos cenários mais críticos de fragmentação florestal, em comparação com outras regiões da Mata Atlântica, com menos de 10% de cobertura original remanescente (Ribeiro et al., 2009). A atividade cafeeira ocasionou modificações drásticas na cobertura vegetal, resultando em extensas áreas degradadas e processos erosivos que persistem até a atualidade (Dean, 1997).

As transformações territoriais não se limitaram ao período cafeeiro. Mudanças recentes no uso da terra, como a conversão de pastagens em plantações de eucalipto, continuam alterando significativamente a dinâmica de carbono e nitrogênio nos solos da região (Santos et al., 2019). Esse processo contínuo de modificação ambiental tem implicações profundas para a estrutura e funcionalidade dos ecossistemas locais, especialmente no que diz respeito à matéria orgânica do solo (MOS).

Nesse contexto, considerando a dinâmica da matéria orgânica do solo como um indicador fundamental das transformações ambientais, este estudo concentra-se na análise das frações da matéria orgânica do solo (MOS) como indicadores dos processos de sucessão ecológica em fragmentos florestais do Vale do Paraíba. A investigação abrangerá as transformações nas características edáficas, com ênfase no carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COP), carbono orgânico associado aos minerais (COam), relação carbono/nitrogênio (C/N) e substâncias húmicas.

As características das frações da matéria orgânica do solo representam potenciais indicadores dos estágios sucessionais em diversos ecossistemas, não se limitando apenas a fragmentos florestais ou ao Vale do Paraíba. Considerando o histórico de degradação provocado pelo ciclo do café e usos subsequentes da terra. Compreender essas características permite identificar os mecanismos de recuperação ambiental e as transformações edáficas associadas aos diferentes níveis de regeneração florestal.

A relevância desta pesquisa reside na necessidade de compreender os mecanismos de recuperação de ecossistemas degradados. A análise dos estoques de carbono em áreas em restauração fornece insights fundamentais sobre a dinâmica de recuperação, permitindo avaliar a eficácia de diferentes estratégias de restauração (Azevedo et al., 2018). Mesmo fragmentos florestais pequenos desempenham papel crucial na provisão de serviços ecossistêmicos (Ferraz et al., 2014). Ao investigar as transformações nas frações da matéria orgânica do solo, este estudo busca contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de restauração ecológica no Vale do Paraíba. A região, como destacam diversos autores, apresenta um mosaico complexo de fragmentos florestais em diferentes estágios de regeneração, tornando fundamental a compreensão dos processos ecológicos que moldam sua recuperação.

O objetivo geral deste estudo foi analisar as frações da MOS como indicadores dos processos de sucessão ecológica em fragmentos florestais do Vale do Paraíba. Para tanto, foram definidos como objetivos específicos, a saber: i) caracterizar as frações químicas e físicas da MOS em diferentes profundidades e fragmentos florestais; e ii) avaliar a distribuição das frações húmicas em diferentes estágios sucessionais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Transformações históricas da paisagem no Vale do Paraíba: impactos dos ciclos econômicos na cobertura florestal

O Vale do Paraíba possui uma história de uso e ocupação das terras marcada por intensas transformações da paisagem e dos ecossistemas naturais. Essa trajetória de modificação ambiental está intrinsecamente ligada aos ciclos econômicos que se sucederam na região, com destaque para o ciclo do café no século XIX, que teve profundos impactos na cobertura florestal e na qualidade do solo (Dean, 1997; Devide, 2013). Essa afirmação é corroborada por estudos mais recentes, que observam que o ciclo do café no Vale do Paraíba provocou profundas transformações na paisagem, resultando em extensas áreas degradadas e processos erosivos que persistem até os dias atuais (Oliveira, 2015; Souza, 2021).

As transformações da paisagem não se restringem ao período cafeeiro, mas continuam a ocorrer por meio de novos ciclos de uso da terra, cada um com diferentes impactos sobre os fragmentos florestais remanescentes (Souza, 2021). O declínio do ciclo do café, no final do século XIX e início do século XX, não significou uma diminuição da pressão sobre os recursos naturais da região, ao contrário, a substituição do café por pastagens extensivas para a criação de gado leiteiro perpetuou o processo de degradação ambiental, sendo assim, o Vale do Paraíba apresenta um dos cenários mais críticos, ressaltando a urgência de ações de conservação e restauração (Ribeiro et al., 2009).

A configuração atual da paisagem no Vale do Paraíba é resultado desse histórico de uso intensivo e muitas vezes inadequado da terra. A distribuição espacial dos remanescentes florestais no Planalto de Ibiúna, parte do Vale do Paraíba paulista, é fortemente influenciada pelo relevo, com maior preservação em áreas de maior declividade (Silva et al., 2007). Isso indica que a topografia da região teve um papel importante na determinação dos padrões de uso da terra e na preservação de fragmentos florestais. A degradação ambiental resultante desse histórico de uso da terra também teve impactos significativos sobre os recursos hídricos da região.

Apesar desse cenário de intensa degradação, estudos recentes indicam um potencial de recuperação para a região. Os fragmentos florestais no Vale do Paraíba, mesmo que pequenos e isolados, são importantes para a provisão de serviços ecossistêmicos, como regulação hídrica e sequestro de carbono (Ferraz et al., 2014). Essa constatação reforça a importância da conservação dos remanescentes florestais e da implementação de estratégias de restauração ecológica. Nesse contexto, a compreensão dos processos de sucessão ecológica torna-se fundamental para o planejamento e a implementação de projetos de restauração florestal no Vale do Paraíba.

2.2. Dinâmica da matéria orgânica e sucessão ecológica em ecossistemas tropicais do Vale do Paraíba

A sucessão ecológica é um processo fundamental na recuperação de áreas degradadas e no restabelecimento da funcionalidade dos ecossistemas, intrinsecamente ligado à dinâmica da matéria orgânica do solo, no contexto do Vale do Paraíba, região historicamente impactada pelo ciclo do café e subseqüentes mudanças no uso da terra (Souza, 2021).

O processo de sucessão ecológica em áreas abandonadas no Vale do Paraíba é caracterizado por mudanças graduais na composição da vegetação e nas propriedades do solo, com aumento gradual na ciclagem de nutrientes, apresentando maiores taxas de deposição e decomposição de serapilheira em estágios mais avançados (Machado et al., 2015). A dinâmica do carbono no solo durante a sucessão ecológica é complexa e influenciada por diversos fatores,

com declínio inicial no estoque de matéria orgânica após a conversão de florestas nativas em sistemas agrícolas (Houghton et al., 1991).

A caracterização da matéria orgânica do solo (MOS) é fundamental para compreender a dinâmica dos ecossistemas florestais, sendo os parâmetros como o carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado (COp) e carbono orgânico associado aos minerais (COam) indicadores essenciais da qualidade do solo e da sua capacidade de sustentar o desenvolvimento da vegetação (Gmach et al., 2018).

A compreensão dos ácidos húmicos, fúlvicos e huminas é essencial para entender o ciclo do carbono, desempenhando funções na retenção de água, formação de agregados do solo e ciclagem de nutrientes (Silva e Mendonça, 2007). Os ácidos húmicos contribuem para a capacidade de troca catiônica e retenção de nutrientes, os ácidos fúlvicos são importantes na mobilização de nutrientes, e as huminas ajudam na estruturação do solo e no armazenamento de carbono a longo prazo (Flaig, 1960; Stevenson, 1994).

A origem desses compostos está relacionada à polimerização de quinonas, que se originam da oxidação de constituintes aromáticos nos resíduos da vegetação, conforme ilustrado na Figura 1.

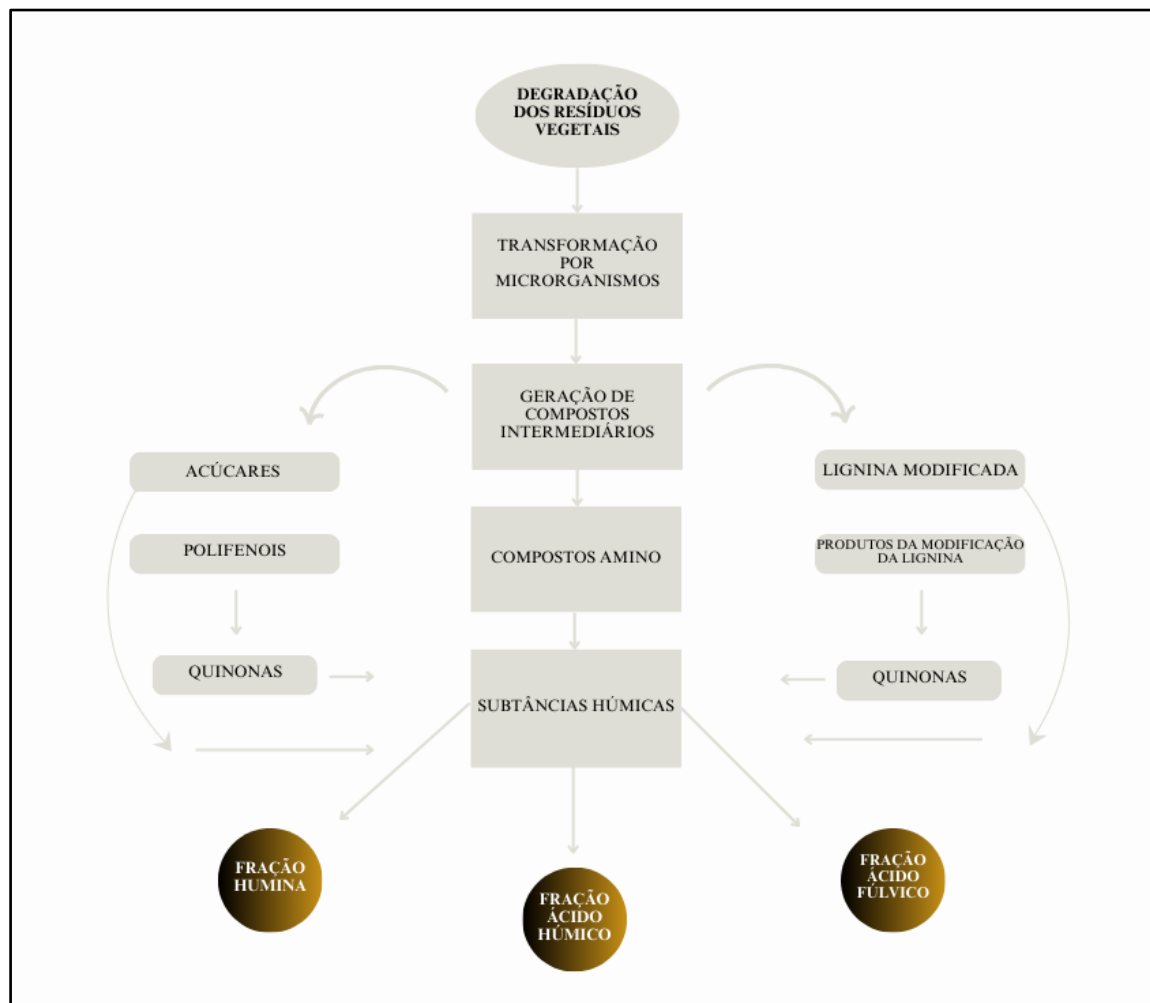


Figura 1: Esquema ilustrativo do processo de formação das substâncias húmicas no solo. Fonte: Adaptado de Stevenson, 1994.

No Vale do Paraíba, região com histórico de degradação ambiental devido ao ciclo do café e à pecuária extensiva, o ciclo do café provocou profundas transformações na paisagem,

resultando em extensas áreas degradadas e processos erosivos (Souza, 2021; Silva et al., 2018). A sucessão natural em áreas abandonadas está ligada à recuperação dos atributos do solo, com o aumento no teor de matéria orgânica do solo ao longo da sucessão ecológica positivamente correlacionado com a diversidade vegetal e a complexidade estrutural da floresta (Nunes, 2019; Teixeira et al., 2020). Essa relação evidencia a necessidade de abordagens integradas na restauração ecológica, considerando tanto a vegetação quanto as características do solo.

2.3. O papel do nitrogênio como indicador de sucessão ecológica

O nitrogênio emerge como elemento central nos processos de sucessão ecológica, especialmente em remanescentes florestais impactados historicamente por ciclos econômicos, como o café no Vale do Paraíba (Souza, 2021). Nesse contexto, a dinâmica de disponibilidade e ciclagem do nitrogênio entrelaça-se intimamente com os processos de recuperação vegetal e a qualidade da matéria orgânica do solo. A introdução de leguminosas arbóreas capazes de formar simbioses com bactérias fixadoras de N_2 e fungos micorrízicos arbusculares acelera a recuperação de áreas degradadas, especialmente em substratos pobres e sob condições adversas. Essas associações simbióticas não apenas melhoram a fertilidade do solo, mas também promovem a sucessão natural e a restauração da biodiversidade, reforçando a importância do nitrogênio como um fator chave na regeneração ecológica (Chaer et al., 2011).

As leguminosas, como as de espécies do gênero Fabaceae, desempenham um papel protagonista nesse processo de recuperação através do enriquecimento do solo através da fixação biológica de nitrogênio, potencializando a recuperação de áreas historicamente degradadas. Espécies como *Pseudopitadenia contorta*, amplamente distribuídas nos fragmentos florestais estudados, ilustram essa dinâmica. Essas leguminosas não apenas fixam nitrogênio, mas também apresentam rápido crescimento e poder de colonização, fundamentais para a recuperação de ecossistemas impactados (Kurtz e Araújo, 2000).

A relação carbono-nitrogênio (C/N) configura-se como indicador sensível das transformações ecológicas, especialmente em áreas com histórico de uso antrópico intenso. Giácomo et al. (2008) evidenciam que essa relação proporciona insights relevantes sobre a qualidade do solo, o estágio de decomposição da matéria orgânica e a disponibilidade de nutrientes para a vegetação. O longo ciclo do café contribuiu significativamente para a exaustão nutricional dos solos regionais. Nesse sentido, a ocorrência de espécimes de Fabaceae nas florestas do Vale do Paraíba torna-se crucial, pois proporciona enriquecimento do solo, beneficiando toda a comunidade vegetal em processo de recuperação.

Os remanescentes florestais carregam um legado complexo de usos temporais e espaciais (Souza, 2021). As variações na relação C/N sinalizam diferentes estágios de desenvolvimento da vegetação, influenciados por fatores como o grau inicial de degradação, a composição da comunidade vegetal e a presença de espécies fixadoras de nitrogênio.

A MOS emerge como indicador promissor do processo de sucessão, revelando que diferentes estágios sucessionais apresentam características distintas em termos de composição, teor de nutrientes e relações entre carbono e nitrogênio (Silva e Mendonça, 2007).

2.4. Influência da matéria orgânica do solo na estruturação e diversidade de comunidades florestais

A MOS desempenha um papel crucial na manutenção e promoção da biodiversidade vegetal em ecossistemas naturais e restaurados. A MOS é um indicador-chave da qualidade e sustentabilidade do solo, impactando propriedades físicas, químicas e biológicas (Maia e Parron, 2015). Em áreas de sucessão ecológica, como as encontradas no Vale do Paraíba, a dinâmica da MOS está intrinsecamente ligada ao processo de recuperação da vegetação e ao

aumento da diversidade de espécies.

O acúmulo de MOS ao longo do processo de sucessão ecológica tem sido consistentemente associado a um aumento gradual na diversidade vegetal e na complexidade estrutural da floresta, estudos em diferentes tipos de floresta mostram um aumento na riqueza de espécies e no número de gêneros à medida que a sucessão avança (Sawczuk et al., 2012; Souto e Boeger, 2011). Este fenômeno pode ser explicado pela melhoria das condições físicas, químicas e biológicas do solo promovidas pela MOS. Neste contexto, Carvalho et al. (2010) evidenciam que o aumento no teor de matéria orgânica está diretamente relacionado à melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, criando condições mais favoráveis para o estabelecimento e a diversificação da vegetação.

As diferentes frações da matéria orgânica do solo exercem papéis distintos, mas complementares, na promoção da diversidade vegetal. As substâncias húmicas, particularmente os ácidos húmicos e fúlvicos, são fundamentais para a manutenção da fertilidade do solo e, conseqüentemente, para a diversidade vegetal (Loss et al., 2010). Os autores enfatizam que os ácidos húmicos, devido à sua maior estabilidade molecular, contribuem significativamente para a capacidade de troca catiônica (CTC) do solo, enquanto os ácidos fúlvicos, mais móveis no perfil do solo, facilitam o transporte de nutrientes.

A distribuição das frações húmicas no solo está diretamente relacionada com a qualidade do ambiente para o desenvolvimento vegetal, onde solos com maior proporção de ácidos húmicos tendem a apresentar maior diversidade de espécies vegetais, possivelmente devido à maior estabilidade da matéria orgânica e melhor estruturação do solo (Giácomo et al., 2008)

A relação carbono/nitrogênio (C/N) surge como um indicador fundamental da qualidade do solo e sua capacidade de suportar uma vegetação diversificada. Pesquisas sobre sucessão florestal e dinâmica da matéria orgânica do solo revelam que a relação C/N ideal varia com o estágio sucessional, influenciando o ciclo de nutrientes e a diversidade da comunidade vegetal. Estágios sucessionais avançados geralmente apresentam maiores estoques de carbono e nitrogênio, melhor fertilidade do solo e maior estabilidade da matéria orgânica (Camara et al., 2018)

A matéria orgânica leve, fração mais dinâmica da MOS, apresenta correlação positiva com a diversidade de espécies vegetais em áreas de restauração (Pereira et al., 2020). Esta fração, caracterizada por uma relação C/N mais estreita, proporciona rápida ciclagem de nutrientes e favorece o estabelecimento de espécies mais exigentes nutricionalmente.

A qualidade da matéria orgânica, expressa através de suas frações húmicas e da relação C/N, também influencia a resiliência do ecossistema. Áreas com maior proporção de ácidos húmicos e relação C/N equilibrada apresentaram maior capacidade de recuperação após distúrbios, evidenciando a importância dessas características para a manutenção da diversidade vegetal a longo prazo (Silva et al., 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e características da área de estudo

As áreas de estudo situam-se na bacia do rio Paraíba do Sul, abrangendo os estados de São Paulo (Vale do Paraíba paulista, 13.900 km²) e do Rio de Janeiro (Vale do Paraíba fluminense, 20.900 km²). Foram selecionados oito fragmentos florestais, sendo três localizados ao norte do estado de São Paulo, nos municípios de São José do Barreiro, Bananal e Arapeí, e cinco ao sul do estado do Rio de Janeiro, distribuídos pelos municípios de Volta Redonda (dois fragmentos), Piraí, Rio Claro (ruínas de São João Marcos) e Barra do Piraí (Figura 2).

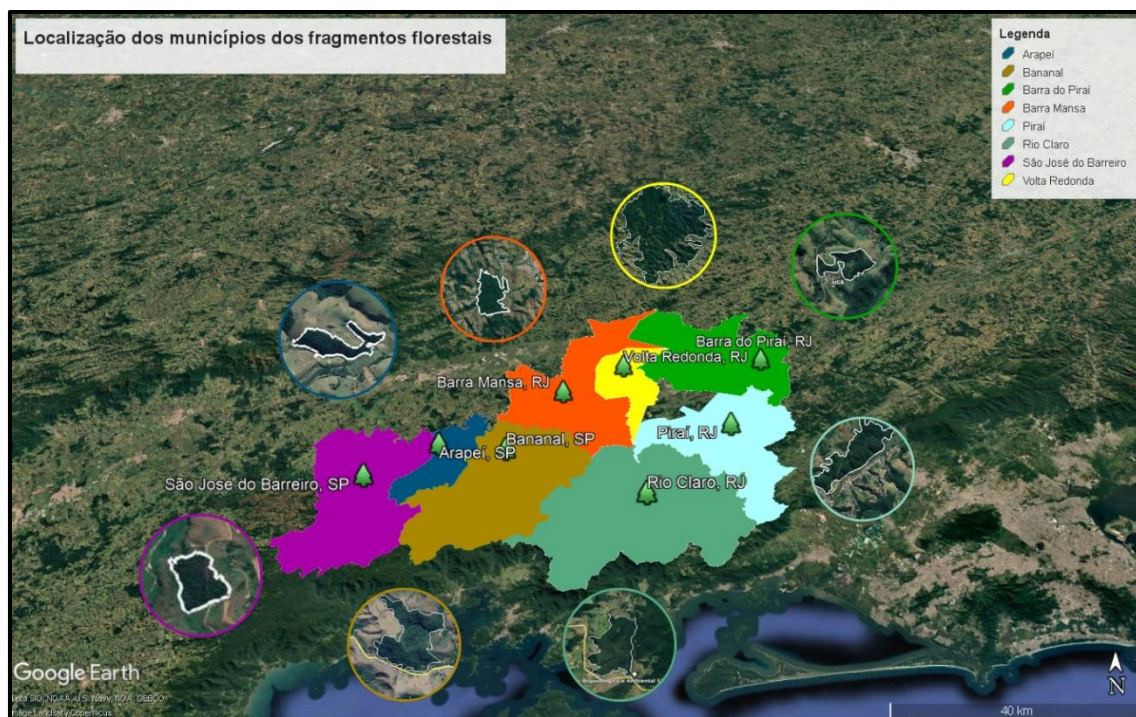


Figura 2: Localização dos municípios das oito áreas estudadas e seus respectivos fragmentos no Vale do Paraíba, Brasil. Fonte: Adaptado com base em Souza (2021).

A seleção das áreas amostrais considerou sua proximidade com antigas fazendas de café do século XIX, uma vez que estas áreas foram historicamente utilizadas para esta atividade econômica. Os fragmentos estudados apresentam diferentes dimensões e características de conservação, conforme detalhado na Tabela 1, com áreas variando de 12, 2 ha a 2.439 ha, tendo sido amostrados 0,2 ha em cada fragmento.

Dentre as áreas estudadas, destacam-se três Unidades de Conservação sob gestão dos diferentes entes federativos: a Floresta da Cicuta (ARIE federal, sob gestão do ICMBio), a Floresta de Santa Cecília do Ingá e a Mata do Amador em Pirai. Os demais fragmentos encontram-se em áreas particulares, condição que os torna mais suscetíveis a impactos como a introdução de espécies invasoras e o corte seletivo.

O Vale do Paraíba do Sul, onde as áreas se localizam, é caracterizado por um conjunto de colinas com diferentes graus de dissecação, compreendendo toda a extensão do Planalto Atlântico. A região está situada em uma depressão entre a Serra do Mar e da Mantiqueira, apresentando topografia típica de morros mamelonares, também conhecidos localmente como "meia laranja", "concha de tartaruga" ou "mares de morros". Os principais materiais de origem são as rochas ácidas (granitos e gnaisses), e as topossequências são geralmente formadas por Latossolos, Cambissolos e Argissolos (Menezes, 2008; Santos et al., 2010).

Tabela 1: Localização e área amostrada dos fragmentos florestais estudados no Vale do Paraíba (SP/RJ), região sudeste do Brasil.

Fragmentos estudados	Estado	Tamanho (km ²)	Área amostrada (km ²)	Percentual amostrado (%)
Arapeí	SP	31,8	0,2	0,6
Bananal	SP	36,8	0,2	0,5
Barra do Pirai	RJ	17,3	0,2	1,2
Volta Redonda – Floresta da Cicuta	RJ	131,0	0,2	0,1
Volta Redonda – Floresta do Ingá	RJ	2439,0	0,2	0,008

Pirai	RJ	115,0	0,2	0,2
Rio Claro	RJ	113,0	0,2	0,2
São José do Barreiro	SP	12,2	0,2	1,6

Fonte: Souza (2021).

O clima da região é tropical úmido - Cwa, segundo classificação de Köppen, caracterizado por verões quentes e chuvosos e invernos secos. A temperatura média anual é de aproximadamente 21 °C, com médias de 25,5 °C em fevereiro e 18,5 °C em julho. A pluviosidade média anual alcança 1.516,6 mm, com baixa evapotranspiração potencial na região do Médio do Paraíba do Sul.

A vegetação das áreas está inserida no domínio ecológico da Mata Atlântica, sendo predominantemente composta por Floresta Estacional Semidecidual Submontana. Nas regiões que compreendem a Serra da Bocaina e Mantiqueira, e suas vertentes voltadas para o vale, encontram-se remanescentes de Floresta Ombrófila Densa e Mista, além de Campos de Altitude nas regiões mais elevadas (Velooso et al., 1991; IBGE, 2012; SIMA/SP 2020).

A matriz vegetacional atual é dominada por espécies de gramíneas africanas, introduzidas durante o ciclo do café, principalmente a braquiária (*Urochloa brizantha* (Hochst. ex A. Rich.) R.D. Webster) e o capim-gordura (*Melinis minutiflora* P. Beauv.), originalmente utilizadas para alimentação do gado (Matos e Pivello, 2009).

3.2. Amostragem e coleta das amostras de terra

O método empregado para cada gradiente florestal foi o de parcelas contíguas. Para cada fragmento, foram plotadas 20 parcelas de 10 × 10 m (100 m²), que consistiram no estabelecimento de pequenas unidades amostrais ao invés de uma única e grande unidade amostral para uma melhor representação da vegetação. Foi selecionada uma única parcela de cada fragmento, e no terço médio de sua encosta foram abertas quatro trincheiras para a coleta das amostras de terra para a caracterização dos atributos físicos e químicos, e análises de MOS. A amostragem foi realizada entre os meses de fevereiro e março de 2021. Em cada trincheira foram coletadas amostras simples para compor uma amostra composta, totalizando quatro amostras compostas por fragmento amostrado.

Cada amostra composta corresponde a uma réplica de campo, coletadas nas camadas de 0–10 e 10–20 cm, perfazendo um conjunto de 64 unidades amostrais (oito fragmentos avaliados × quatro pseudorepetições × duas camadas). Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas por peneira de 2,0 mm de diâmetro de malha para obter a fração terra fina seca ao ar (TFSA). As amostras foram devidamente identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Indicadores de Sustentabilidade Ambiental do Departamento de Solos da UFRRJ. No laboratório, procedeu-se ao preparo das amostras, que foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm de diâmetro, obtendo-se assim a terra fina seca ao ar (TFSA) (Teixeira et al., 2017). O carbono orgânico total (COT) do solo foi determinado via oxidação úmida da matéria orgânica do solo segundo Yeomans e Bremner (1988).

3.3. Fracionamento granulométrico da matéria orgânica e teores de carbono e nitrogênio do solo

O fracionamento granulométrico da MOS foi realizado seguindo metodologia proposta por Cambardella e Elliot (1993), que permite a separação em duas frações principais: a fração particulada (relacionada à fração areia do solo) e a fração associada aos minerais (relativa às frações argila e silte).

O carbono orgânico particulado (COP) foi determinado por meio da dispersão da

amostra de solo em hexametáfosfato de sódio (4 g L^{-1}) e agitação por 16 h. Após dispersão, realizou-se separação por peneiramento úmido ($0,053 \text{ mm}$), com posterior secagem e quantificação do carbono na fração particulada. Enquanto o carbono orgânico associado aos minerais (COam) foi calculado pela diferença entre o COT e o COp.

A matéria orgânica leve (MOL) foi obtida através do fracionamento densimétrico em água, segundo Anderson e Ingram (1989). O procedimento consistiu na pesagem de 50 g de terra fina seca ao ar (TFSA), seguida da adição de 100 mL de $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$. Após período de repouso de 18 horas, o material foi peneirado ($0,25 \text{ mm}$) para separação da MOL, que posteriormente foi seca em estufa a 65°C , até peso constante. Os teores de carbono da MOL foi determinado conforme Yeomans e Bremner (1988).

O nitrogênio da MOL foi determinado por digestão com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio, seguindo a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). O procedimento envolveu a destilação a vapor (método Kjeldahl) utilizando hidróxido de sódio, com posterior titulação do destilado em ácido bórico para quantificação do nitrogênio total.

3.4. Fracionamento químico da matéria orgânica do solo

O fracionamento químico das substâncias húmicas foi realizado conforme a técnica de solubilidade diferencial estabelecida pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas (IHSS), com adaptações propostas por Benites et al. (2003). Este processo permitiu a quantificação dos teores de carbono nas frações ácidos fúlvicos (CFAF), ácidos húmicos (CFAH) e humina (CHUM).

O processo de extração iniciou-se com o tratamento das amostras com $\text{NaOH } 0,1 \text{ mol L}^{-1}$ (relação solo:extrator 1:10 p/v), seguido de centrifugação a 5.000 g por 30 minutos. O extrato alcalino teve seu pH ajustado para $1,0 \pm 0,1$ com H_2SO_4 20%, seguido de decantação por 18 horas para separação das frações. A determinação quantitativa do carbono nas diferentes frações húmicas foi realizada por oxidação com dicromato de potássio e titulação com sulfato ferroso amoniacal, conforme Yeomans e Bremner (1988).

A partir dos dados obtidos, foram calculadas as relações de carbono dos ácidos húmicos por carbono dos ácidos fúlvicos (CFAH/CFAF), carbono do extrato alcalino por carbono da humina (C-Ext.Alc./C-HUM) e carbono do extrato alcalino por carbono orgânico total (C-Ext.Alc./COT). Adicionalmente, determinaram-se os percentuais de cada fração em relação ao carbono orgânico total, incluindo o percentual de carbono da humina, dos ácidos húmicos e dos ácidos fúlvicos.

O carbono não humificado foi determinado pela diferença entre o carbono orgânico total e a soma das frações humificadas (CFAF + CFAH + CHUM). O percentual de carbono humificado foi obtido pela soma do carbono das três frações húmicas, enquanto o percentual de carbono não humificado foi calculado pela diferença entre o carbono orgânico total e o carbono humificado.

3.5. Análises estatísticas

Os dados foram analisados estatisticamente com uso do Software Estatístico R (R Core Team, 2021). A análise de Variância (ANOVA) foi utilizada para comparar os atributos de matéria orgânica do solo entre os fragmentos estudados, considerando suas frações e as profundidades de coleta ($0\text{-}10$ e $10\text{-}20 \text{ cm}$). A validação dos pressupostos da ANOVA foi realizada através dos testes de Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos, e, em grande parte dos casos, os resíduos atenderam ao pressuposto de normalidade (valor- $p > 0,05$). O Teste de Bartlett foi empregado para avaliar a homogeneidade das variâncias, sendo que, na maioria dos casos, os resultados indicaram homogeneidade, exceto para alguns atributos específicos onde

as variâncias apresentaram diferenças significativas (valor-p < 0,05). Ainda assim, os dados foram analisados com ANOVA considerando-se essas características.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fracionamento granulométrico da matéria orgânica do solo revelou padrões que podem indicar diferentes estágios sucessionais entre as áreas estudadas. A distribuição vertical do carbono no solo revelou tendências características para cada fração analisada, como evidenciado na Tabela 2.

Tabela 2: Teores das frações da matéria orgânica do solo sob diferentes fragmentos florestais do Vale do Paraíba (RJ/SP), região sudeste do Brasil.

Áreas Florestais	----- 0–10 cm -----			----- 10–20 cm -----		
	COT	CO _p	CO _{am}	COT	CO _p	CO _{am}
	----- g kg ⁻¹ -----			----- g kg ⁻¹ -----		
Arapeí	50,61 ^A	36,75 ^A	13,86 ^B	38,51 ^A	18,25 ^A	20,27 ^A
Bananal	28,80 ^C	8,76 ^B	20,03 ^B	14,77 ^B	2,59 ^C	12,18 ^B
Barra do Pirai	34,51 ^B	10,88 ^B	23,63 ^A	17,33 ^B	2,57 ^C	14,76 ^B
Floresta da Cicuta	35,45 ^B	7,69 ^B	27,76 ^A	16,05 ^B	2,82 ^C	13,23 ^B
Floresta do Ingá	27,60 ^C	8,43 ^B	19,17 ^B	23,10 ^A	4,96 ^B	18,14 ^A
Pirai	36,28 ^B	9,04 ^B	27,24 ^A	27,03 ^A	3,53 ^C	23,50 ^A
Rio claro	21,96 ^C	5,90 ^B	16,06 ^B	11,49 ^B	1,99 ^C	9,49 ^B
São José do Barreiro	35,58 ^B	13,45 ^B	22,13 ^A	14,85 ^B	6,07 ^B	8,78 ^B

Áreas Florestais	----- 0–10 cm -----					
	NT	C:N _{SOLO}	MOL	CMOL	NMOL	C:N _{MOL}
	----- g kg ⁻¹ -----					
Arapeí	6,47 ^A	7,91 ^A	37,07 ^A	12,21 ^A	1,14 ^A	10,72 ^A
Bananal	5,18 ^B	5,66 ^B	8,66 ^C	2,39 ^B	0,33 ^B	7,69 ^D
Barra do Pirai	4,32 ^B	7,96 ^A	9,53 ^C	3,58 ^B	0,40 ^B	9,03 ^B
Floresta da Cicuta	3,81 ^B	10,32 ^A	6,68 ^C	1,55 ^B	0,18 ^B	8,46 ^B
Floresta do Ingá	3,85 ^B	7,45 ^A	1,98 ^D	0,61 ^B	0,07 ^C	8,32 ^B
Pirai	4,76 ^B	7,83 ^A	3,70 ^D	1,12 ^B	0,10 ^C	10,89 ^A
Rio claro	4,47 ^B	5,02 ^B	4,28 ^D	0,87 ^B	0,12 ^C	7,71 ^C
São José do Barreiro	4,17 ^B	8,64 ^A	15,99 ^B	2,53 ^B	0,63 ^A	4,24 ^E

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna não diferem as áreas florestais. ANOVA + Teste de Scott-Knott sem transformações de dados a 5% de probabilidade. ANOVA + Teste de Scott-Knott com transformações de dados a 5% de probabilidade.

Na camada de 0–10 cm, os maiores teores de carbono orgânico total (COT) foram observados em Arapeí, enquanto os menores valores ocorreram em Rio Claro. Já na camada de 10–20 cm, os teores de COT diminuíram em relação à camada superficial na maioria das áreas, exceto em Floresta do Ingá e Pirai, onde foi observado um incremento. Nesta profundidade, Arapeí manteve o maior teor, e Rio Claro continuou a apresentar os menores valores. A redução dos teores de COT da camada superficial para a subsuperficial é um padrão observado na maioria dos sistemas florestais. Essa distribuição vertical reflete os processos de deposição e decomposição de serrapilheira, fundamentais para a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais. Os teores de carbono orgânico particulado (CO_p) seguiram um padrão semelhante ao do COT, com redução em profundidade em todas as áreas analisadas, exceto em Arapeí, onde destacou-se na camada superficial, com valores superiores em Arapeí, indicando um estágio mais avançado de regeneração florestal, no qual a deposição de material orgânico recente e sua decomposição são mais intensas. Por outro lado, o carbono orgânico associado

aos minerais (COAM) apresentou relativa estabilidade entre as áreas, com incremento na camada de 10-20 cm para a maioria dos fragmentos. Esse comportamento ressalta a importância dos processos de estabilização do carbono orgânico junto às frações minerais do solo, resultando em um reservatório mais protegido e resiliente frente a distúrbios ambientais.

Os maiores teores de COAM observados em algumas áreas podem ser indicativos de estágios sucessionais mais avançados, onde a matéria orgânica apresenta maior estabilização. Isso ocorre devido a mecanismos como proteção física por agregação do solo, formação de complexos organo-minerais, interação com minerais de argila e processos de humificação. Esses fatores são fundamentais para a retenção de carbono e a manutenção da fertilidade do solo.

Áreas em estágios mais avançados de sucessão ecológica tendem a apresentar maior diversidade de espécies vegetais, o que contribui para maior aporte e variabilidade de material orgânico ao solo (Machado et al., 2015). Também é estabelecido em determinados estudos uma correlação entre maiores teores de matéria orgânica e áreas mais preservadas da Mata Atlântica (Fontana et al., 2011). No entanto, a recuperação dos teores de carbono em áreas degradadas constitui um processo gradual, condicionado por fatores locais (Shinamoto et al., 2018).

A análise da matéria orgânica leve (MOL) nos fragmentos florestais analisados revelou padrões significativos que permitem interpretar os estágios sucessionais e a dinâmica ecológica de cada área. Os maiores teores de MOL foram observados em Arapeí, seguidos por São José do Barreiro, enquanto Floresta do Ingá e Piraí apresentaram os menores valores. Tal padrão pode ser atribuído aos diferentes estágios de sucessão florestal, uma vez que áreas mais avançadas geralmente exibem maior aporte de material orgânico devido à maior deposição e decomposição da serapilheira.

Os valores de carbono na fração MOL (CMOL) seguiram tendência semelhante, com Arapeí registrando os maiores valores e áreas como São José do Barreiro apresentando menores quantidades. A presença de espécies fixadoras de nitrogênio, especialmente leguminosas, pode explicar essa variação, pois tais espécies desempenham papel central na ciclagem de nutrientes e na melhoria da qualidade da matéria orgânica do solo. Conforme Oliveira (2015), essas espécies são essenciais para estágios avançados de sucessão, uma vez que promovem maior estabilidade estrutural e funcional da vegetação.

Os teores de nitrogênio total (NT) e nitrogênio associado à fração leve (NMOL) também apresentaram diferenças significativas entre os fragmentos. Os maiores valores médios de NT foram observados em Arapeí, enquanto as áreas da Floresta da Cicuta e Floresta do Ingá registraram os menores valores. Áreas como Bananal, Piraí e Rio Claro apresentaram valores intermediários e relativamente uniformes. A relação entre os teores de NT e NMOL sugere que a qualidade e a decomposição da serapilheira influenciam diretamente a ciclagem de nitrogênio e a disponibilidade de matéria orgânica no solo (Nascimento et al., 2010).

A heterogeneidade nos valores de NMOL reflete o impacto das condições edafoclimáticas locais, da composição da vegetação e do histórico de uso do solo. Em Arapeí e São José do Barreiro, os maiores valores de NMOL indicam maior disponibilidade de nitrogênio, associada a uma serapilheira de maior qualidade e um estágio sucessional mais avançado. Em contraste, as áreas da Floresta do Ingá e Piraí, com menores valores, podem refletir condições de degradação e menor aporte de material orgânico.

O padrão de relação C/N observado tanto no solo quanto na fração MOL reforça as diferenças entre os fragmentos. A Floresta da Cicuta apresentou os maiores valores de relação C/N do solo, indicando um estágio sucessional mais avançado, com maior acúmulo de carbono e menor mineralização do nitrogênio. Em contraste, áreas como Bananal e Rio Claro, com valores mais baixos de relação C/N, sugerem um histórico de uso mais intensivo, especialmente associado à antiga cafeicultura, conforme discutido por Rangel et al. (2008).

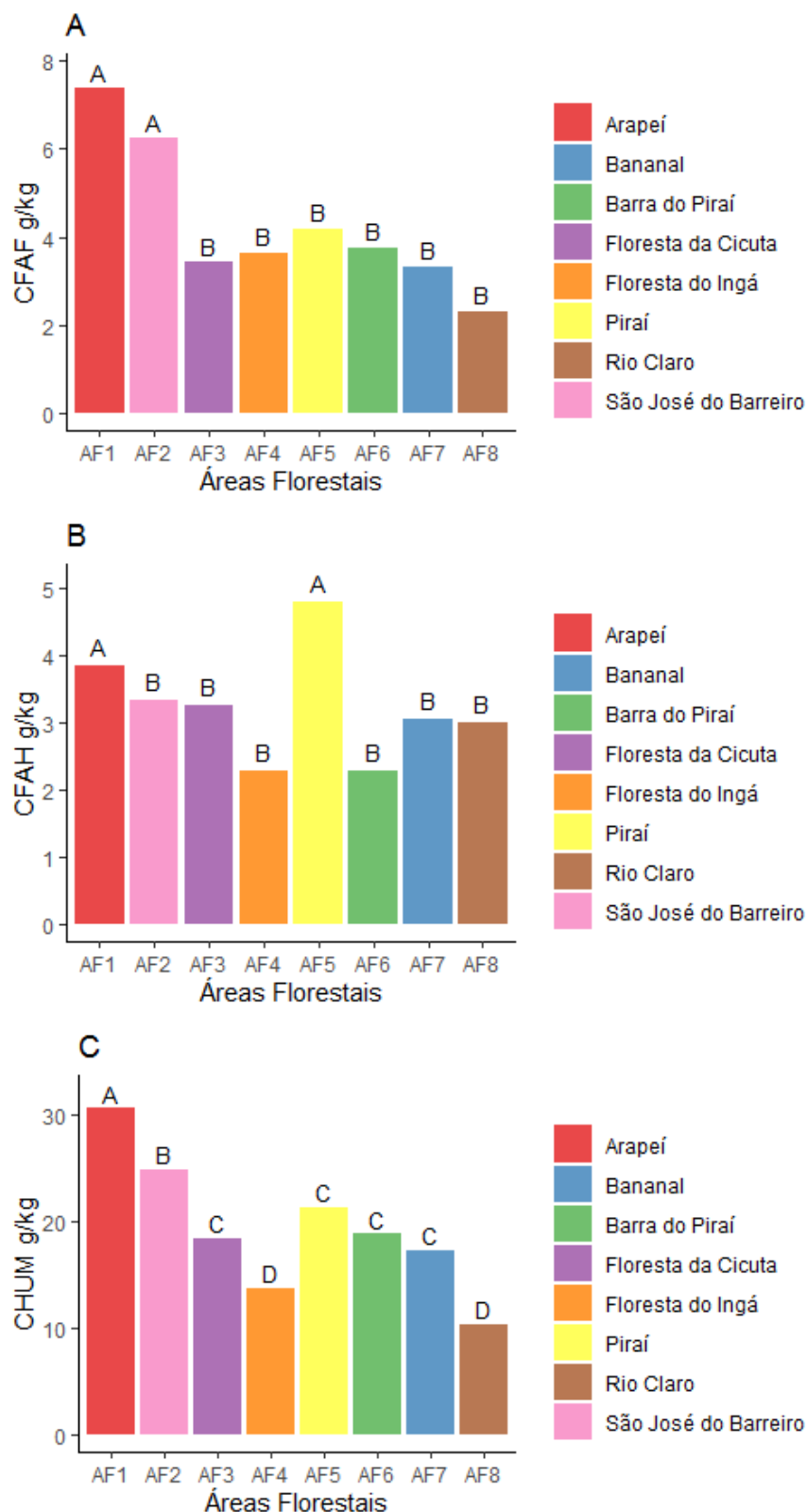


Figura 3. Teores de carbono orgânico das frações húmicas da matéria orgânica do solo sob diferentes fragmentos florestais do Vale do Paraíba (RJ/SP), região sudeste do Brasil.

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula não diferem as áreas florestais. ANOVA + Teste de Scott-Knott sem transformações de dados a 5% de probabilidade; e ANOVA + Teste de Scott-Knott com transformações de dados a 5% de probabilidade. (A) Carbono orgânico da fração ácido fúlvico – CFAF; (B) Carbono orgânico da fração ácido húmico – CFAH; e (C) Carbono orgânico da fração húmica – CHUM.

Na fração MOL, Pirai destacou-se com os maiores valores de relação C/N, refletindo

maior proporção de carbono particulado em relação ao nitrogénio. Esse padrão pode estar associado a uma maior complexidade da serapilheira e a um estágio ecológico mais resiliente, como apontado por Oliveira e Engemann (2011). Por outro lado, valores baixos de relação C/N em Bananal e Rio Claro refletem as consequências do uso histórico do solo, com menor capacidade de acumulação de carbono e nitrogénio na fração leve.

A dinâmica da matéria orgânica e da relação C/N entre os fragmentos é influenciada pela trajetória histórica da paisagem e pelos processos ecológicos atuais. Souza (2021) destaca que o legado da cafeicultura ainda é evidente em áreas como Bananal e Rio Claro, onde os valores de relação C/N são mais baixos, refletindo menor resiliência ecológica. Em contraste, fragmentos como Arapeí e a Floresta da Cicuta apresentam padrões indicativos de maior estabilidade ecológica e avanço sucessional.

Esses resultados evidenciam que o estudo das frações de matéria orgânica, especialmente a MOL e o CMOL, constitui uma ferramenta importante para avaliar os estágios de sucessão ecológica em fragmentos florestais. A relação C/N emerge como um indicador robusto para compreender a dinâmica do carbono e do nitrogénio no solo, permitindo interpretar os processos de regeneração e identificar os fatores que influenciam a ciclagem de nutrientes em ecossistemas florestais fragmentados.

Quanto as substâncias húmicas, como visto na Figura 3, para o carbono da fração ácido fúlvico (CFAF), Arapeí novamente se destacou com valores elevados, seguido por São José do Barreiro. Esses resultados são consistentes com os achados que relacionam maiores concentrações de ácidos fúlvicos a estágios mais avançados de sucessão florestal (Fontana et al., 2020). A maior presença dessa fração em Arapeí sugere uma interação mais ativa entre a matéria orgânica e os minerais do solo, conferindo maior resistência às mudanças no solo.

Quanto a análise do carbono da fração ácido húmico (CFAH) evidenciou maior heterogeneidade entre as áreas. Piraí destacou-se com os maiores valores, enquanto a Floresta do Ingá apresentou os menores teores. Essa variabilidade reflete diferentes níveis de humificação da matéria orgânica, associados aos processos de transformação dos compostos orgânicos no solo. A heterogeneidade das frações húmicas pode estar ligada às condições ambientais locais e à qualidade do aporte orgânico (Loss et al., 2010).

Para a fração do carbono da humina (CHUM) observou-se uma variação significativa nos teores de carbono, Arapeí destacou-se com os valores mais elevados, seguido por São José do Barreiro, enquanto Rio Claro apresentou os menores teores. Esses resultados indicam que áreas com maior tempo de regeneração e menor impacto histórico tendem a apresentar frações mais estáveis, como identificado por Silva e Mendonça (2007).

A distribuição diferencial das frações húmicas entre as áreas pode ser explicada pelo histórico de uso e pelos diferentes estágios sucessionais (Giácomo et al., 2008). As áreas de Arapeí e São José do Barreiro, que apresentaram os maiores valores nas frações mais estáveis (humina), possivelmente encontram-se em estágios mais avançados de regeneração, por (Silva e Mendonça, 2007).

Esta variabilidade nos teores de carbono nas diferentes frações húmicas tem implicações diretas para a qualidade do solo e a estabilidade dos ecossistemas em regeneração (Fontana et al., 2014). Esta tendência tem importantes implicações para o manejo e conservação dessas áreas, pois indica que a proteção de fragmentos florestais por períodos mais longos favorece a formação de matéria orgânica mais estável, contribuindo para a qualidade do solo e a sustentabilidade do ecossistema.

De acordo com Machado et al. (2015), compreender a distribuição das frações de matéria orgânica é fundamental para definir estratégias de manejo que promovam a estabilidade ecológica e o sequestro de carbono. Além disso, os padrões observados refletem a influência do histórico de uso do solo e dos diferentes estágios de sucessão ecológica na dinâmica da matéria orgânica. Portanto, áreas como Bananal e Barra do Piraí, que possuem proporções

elevadas de carbono não humificado, podem demandar maior atenção no que diz respeito à conservação e manejo, visando a recuperação dos processos ecológicos e o incremento na estabilidade da matéria orgânica do solo.

Esses resultados ressaltam a complexidade dos processos ecológicos nos fragmentos florestais estudados e reforçam a importância de abordagens integradas na conservação de ecossistemas florestais.

5. CONCLUSÃO

Os resultados do estudo demonstraram a complexidade da matéria orgânica do solo nos fragmentos florestais do Vale do Paraíba, evidenciando padrões distintos de recuperação ecológica. A análise das frações químicas e físicas do material orgânico revelou variações entre os diferentes fragmentos e profundidades estudadas.

O fragmento florestal de Arapeí se destacou pela maior concentração de carbono orgânico total nas frações físicas e químicas da matéria orgânica do solo, sugerindo condições mais favoráveis para a estabilização e acúmulo de material orgânico ao longo do processo de sucessão ecológica. Em contraste, os fragmentos de Rio Claro, Floresta do Ingá, Barra do Pirai e Bananal apresentaram teores mais baixos nas frações da matéria orgânica do solo, indicando estágios menos avançados de recuperação pós-ciclo do café.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados confirmam que as frações da matéria orgânica do solo podem ser utilizadas como indicadores eficientes dos processos sucessionais. Esses indicadores fornecem subsídios cruciais para o desenvolvimento de estratégias de conservação e restauração florestal, considerando as especificidades de cada condição edafo-ambiental.

A pesquisa destaca a importância de uma análise abrangente na avaliação da recuperação de áreas florestais, demonstrando que a análise da matéria orgânica do solo vai além de medições simples, incorporando uma análise completa dos processos ecológicos e histórico de uso da terra.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, J. M.; INGRAM, J. S. I. **Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods**. Wallingford: CAB International, 1989.
- AZEVEDO, A. D.; CAMARA, R. K.; FRANCELINO, M. R.; PEREIRA, M. G.; LELES, P. S. Estoque de carbono em áreas de restauração florestal da Mata Atlântica. 2018.
- BALDOTTO, M. A.; VIEIRA, E. M.; SOUZA, D. D.; BALDOTTO, L. E. Estoque e frações de carbono orgânico e fertilidade de solo sob floresta, agricultura e pecuária. 2015.
- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. **Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. (Comunicado Técnico, 16).
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Methods for physical separation and characterization of soil organic matter fractions. **Geoderma**, v. 56, n. 1-4, p. 449-457, 1993.

CAMARA, R. K.; SILVA, V. D.; DELAQUA, G. C.; LISBÔA, C. P.; VILLELA, D. M. Relação entre sucessão secundária, solo e serapilheira em uma reserva biológica no estado do Rio de Janeiro, Brasil. **Ciência Florestal**, 2018.

CARVALHO, J. L. N. et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2010.

CHAER, G. M. et al. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. **Tree Physiology**, v. 31, n. 2, p. 139-149, 2011

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 19-31, 2014.

DEAN, W. **A ferro e fogo: a história e a devastação da Mata Atlântica brasileira**. São Paulo: Companhia das Letras, 1997.

DEVIDE, A. C. P. **História ambiental do Vale do Paraíba**. Revisão de literatura para qualificação ao nível de Doutorado em Fitotecnia – Área de Concentração Agroecologia. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2013.

FERRAZ, S. F. B. et al. How good are tropical forest patches for ecosystem services provisioning? **Landscape Ecology**, v. 29, n. 2, p. 187-200, 2014.

FLAIG, W. Chemistry of humic substances. In: **The use of isotopes in soil organic matter studies**. Report of FAO/IAEA Technical Meeting. New York: Pergamon, 1960.

FONTANA, A.; SILVA, C. G.; PEREIRA, M. G.; LOSS, A.; BRITO, R. J.; BENITES, V. D. Avaliação dos compartimentos da matéria orgânica em área de Mata Atlântica. **Acta Scientiarum-agronomy**, v. 33, p. 545-550, 2011.

FONTANA, A.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. dos; SANTOS, A. C. dos; BERNINI, T. A. Matéria orgânica de horizontes superficiais em topolitossequências em ambiente de Mar de Morros, Pinheiral, RJ. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 45, n. 2, p. 221-229, abr-jun. 2014.

GIÁCOMO, R. G. et al. Atributos químicos e físicos do solo, estoques de carbono e nitrogênio e frações húmicas em diferentes formações vegetais. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 2, p. 207-213, 2008.

GMACH, M. R. et al. Soil organic matter dynamics and land-use change on Oxisols in the Cerrado, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 14, e00178, 2018.

HOUGHTON, R. A. et al. The flux of carbon from terrestrial ecosystems to the atmosphere in 1980 due to changes in land use: geographic distribution of the global flux. **Tellus B**, v. 43, n. 2, p. 152-163, 1991.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

KURTZ, B. C.; ARAÚJO, D. S. D. Composição florística e estrutura do componente arbóreo de um trecho de Mata Atlântica na Estação Ecológica Estadual do Paraíso, Cachoeiras de Macacu, Rio de Janeiro, Brasil. **Rodriguésia**, v. 51, n. 78/79, p. 69-111, 2000.

LOSS, Arcângelo; MORAES, André Geraldo de Lima; PEREIRA, Marcos Gervasio; SILVA, Eliane Maria Ribeiro da; ANJOS, Lúcia Helena Cunha dos. Carbono, matéria orgânica leve e frações oxidáveis do carbono orgânico sob diferentes sistemas de produção orgânica. **Comunicata Scientiae**, v.1, n.1, p. 57-64, 2010.

LOSS, A. et al. Distribuição dos agregados e carbono orgânico influenciados por manejos agroecológicos. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 3, p. 523-528, 2010.

MACHADO, D. L. **Atributos indicadores da dinâmica sucessional em fragmento de Mata Atlântica na região do Médio Vale do Paraíba do Sul, Pinheiral, Rio de Janeiro**. 2011. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais e Florestais) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2011.

MACHADO, D. L. et al. Ciclagem de nutrientes em diferentes estágios sucessionais da Mata Atlântica na bacia do Rio Paraíba do Sul, RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1093-1104, 2015.

MARTINS, C. M.; COSTA, L. M.; SCHAEFER, C. E.; SOARES, E.; SANTOS, S. R. Frações da matéria orgânica em solos sob formações decíduais no norte de Minas Gerais 1. **Revista Caatinga**, v. 28, p. 10-20, 2015.

MATOS, D. M. S.; PIVELLO, V. R. O impacto das plantas invasoras nos recursos naturais de ambientes terrestres: alguns casos brasileiros. **Ciência e Cultura**, v. 61, n. 1, p. 27-30, 2009.

MENEZES, C. E. G. **Integridade de paisagem, manejo e atributos do solo no Médio Vale do Paraíba do Sul, Pinheiral-RJ**. 2008. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.

MONTEIRO, M. T.; GAMA-RODRIGUES, E. F. Carbono, nitrogênio e atividade da biomassa microbiana em diferentes estruturas de serapilheira de uma floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 819–826, set. 2004.

NASCIMENTO, P. C. DO . et al. Teores e características da matéria orgânica de solos hidromórficos do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 2, p. 339–348, mar. 2010.

NUNES, A. Mudanças na paisagem e serviços dos ecossistemas: Abandono agrícola e variação no carbono orgânico dos solos. **Cadernos de Geografia**, 2019.

OLIVEIRA, R. R. Ação antrópica e resultantes sobre a estrutura e composição da Mata Atlântica na Ilha Grande, RJ. **Rodriguésia**, v. 53, n. 82, p. 33-58, 2002.

OLIVEIRA, R. R. “Fruto da terra e do trabalho humano”: paleoterritórios e diversidade da Mata Atlântica no Sudeste brasileiro. **Revista de História Regional**, v. 20, n. 2, p. 277-299, 2015.

OLIVEIRA, R. R.; ENGEMANN, C. História da paisagem e paisagens sem história: a presença humana na Floresta Atlântica do Sudeste Brasileiro. **Esboços: histórias em contextos globais**, v. 18, n. 25, p. 9-31, 2011.

PARRON, L. M.; GARCIA, J. R.; OLIVEIRA, E. B. de; BROWN, G. G.; PRADO, R. B. (Ed.). Serviços ambientais em sistemas agrícolas e florestais do Bioma Mata Atlântica. Brasília, DF: **Embrapa**, 2015.

PEREIRA, M. G. et al. Caracterização e classificação de solos em uma topossequência sobre calcário na Serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 1, p. 25-36, 2020.

R Core Team (2021). R: **A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2051-2059, 2008.

REZENDE, C. L. et al. From hotspot to hopespot: An opportunity for the Brazilian Atlantic Forest. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 16, n. 4, p. 208-214, 2018.

RIBEIRO, M. C. et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

SANTOS, R. D. et al. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

SAWCZUK, A. R.; FILHO, A. F.; DIAS, A. N.; WATZLAWICK, L. F.; STEPKA, T. F. Alterações na estrutura e na diversidade florística no período 2002-2008 de uma floresta ombrófila mista montana do centro-sul do Paraná, Brasil. 2012.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

SILVA, A. C. et al. Soil organic matter and composition of humic substances in tropical forest fragments. **Geoderma**, v. 382, p. 114718, 2021.

SILVA, J. E. et al. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the Cerrado region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 103, n. 2, p. 342-349, 2007.

SILVA, R. F. et al. Atributos físicos e teor de matéria orgânica na camada superficial de um Argissolo Vermelho cultivado com mandioca sob diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 6, p. 2435-2441, 2012.

SIMA. **Inventário florestal do estado de São Paulo, mapeamento da cobertura vegetal nativa**. Secretaria de Infraestrutura e meio ambiente. Gov. do estado de São Paulo. Instituto Florestal, 2020

SHIMAMOTO, C.Y.; PADIAL, A.A.; ROSA, C.M. MARQUES, M.C.M. Restoration of ecosystem services in tropical forests: A global meta-analysis. **PloS one**, v. 13, n. 12, p. e0208523, 2018.

SOLÓRZANO, A. et al. Composição florística e estrutura de um trecho de floresta ombrófila densa atlântica com uso pretérito de produção de banana, em Paraty, RJ. **Revista Árvore**, v. 33, n. 3, p. 451-462, 2009.

SOUTO, M. A.; BOEGER, M. R. Estrutura e composição do estrato de regeneração e vegetação associada de diferentes estádios sucessionais no leste do Paraná. **Ciencia Florestal**, v. 21, p. 393-407, 2011.

SOUZA, T. C. O. **Biogeografia histórica da Mata Atlântica: padrões e processos a partir da análise de fragmentos florestais do médio Vale do Paraíba do Sul, RJ/SP**. 2021. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. (Boletim Técnico, 5).

TEIXEIRA, H. M.; CARDOSO, I. M.; BIANCHI, F. J.; SILVA, A. D.; JAMME, D.; PEÑA-CLAROS, M. Linking vegetation and soil functions during secondary forest succession in the Atlantic forest. **Forest Ecology and Management**, v. 457, p. 117696, 2020.

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMA, G.K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília, DF: Embrapa, Livro técnico (INFOTECA-E), 3. ed. rev. e ampl.2017. 573p.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.