



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA PARA  
RECURSOS AMAZÔNICOS (PPGCTRA)

PAULO RICARDO RAMIRES BARROSO

**EFEITOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NOS ATRIBUTOS E  
ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO DE FLORESTAS NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA**

ITACOATIARA  
2025

PAULO RICARDO RAMIRES BARROSO

**EFEITOS DO MANEJO FLORESTAL SUSTENTÁVEL NOS ATRIBUTOS E  
ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO DE FLORESTAS NA AMAZÔNIA  
BRASILEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos – PPGCTRA, da Universidade Federal do Amazonas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos, área de concentração Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Recursos Amazônicos.

Linha de pesquisa: Agrobioenergia, análise e manejo de recursos amazônicos.

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup> Louri Klemann Junior  
Coorientador: Prof<sup>o</sup>. Dr<sup>o</sup> Luís Antônio Coutrim dos Santos

ITACOATIARA  
2025

Ficha Catalográfica

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

---

- B277e Barroso, Paulo Ricardo Ramires  
Efeitos do manejo florestal sustentável nos atributos e estoque de carbono do solo de florestas na Amazônia Brasileira / Paulo Ricardo Ramires Barroso. - 2025.  
46 f. : il., color. ; 31 cm.
- Orientador(a): Louri Klemann Junior.  
Coorientador(a): Luís Antônio Coutrim dos Santos.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos, Itacoatiara, 2025.
1. Estoque de carbono. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Impactos ambientais. 4. Manejo florestal sustentável. 5. Mudanças climáticas. I. Klemann Junior, Louri. II. Santos, Luís Antônio Coutrim dos. III. Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos. IV. Título
-



## Paulo Ricardo Ramires Barroso

### Efeitos do manejo florestal sustentável nos atributos e estoque de carbono do solo de florestas na Amazônia Brasileira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos, área de concentração Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Recursos Amazônicos.

Aprovado em 28 de fevereiro de 2025.

#### BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** LOURI KLEMMANN JUNIOR  
Data: 03/03/2025 19:15:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Louri Klemann Junior  
Presidente/Orientador

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** RICARDO AUGUSTO SERPA CERBONCINI  
Data: 04/03/2025 10:22:59-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Augusto Serpa Cerboncini  
Membro

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ERICO LUIS HOSHIBA TAKAHASHI  
Data: 05/03/2025 10:11:12-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Erico Luis Hoshiba Takahashi  
Membro

À minha mãe, por não medir esforços para que eu realizasse esta conquista; sempre me incentivando com muito amor e me apoiando em todos os momentos difíceis da minha vida.

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser meu refúgio e fortaleza.

À minha mãe, Elizany, e a toda minha família, por todo apoio, amor e orações.

À minha namorada, Suzyane, por todo incentivo e carinho.

À Universidade Federal do Amazonas (UFAM) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia para Recursos Amazônicos (PPGCTRA) pela oportunidade de realizar este estudo.

Ao professor Dr. Ricardo Augusto Cerboncini, por todas as suas contribuições, as quais foram essenciais para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Dr. Louri Klemann Jr., pela orientação, parceria e pela oportunidade de alcançar mais um objetivo em minha trajetória acadêmica.

Ao meu coorientador, professor Dr. Luís Antônio Coutrim, e toda a equipe do Laboratório de Solos da UEA, em especial a Anderson e Noeme, pelo suporte essencial durante os procedimentos laboratoriais.

A todos os professores do PPGCTRA, pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pela concessão da bolsa.

À empresa Mil Madeiras Preciosas, por ceder a área para coleta de dados.

Aos meus amigos e a todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte de mais esta etapa da minha vida.

*“O temor do Senhor é o princípio da  
sabedoria”.*

*Provérbios 1:7*

## RESUMO

Os impactos das atividades humanas resultam no avanço das mudanças climáticas no planeta. Estudos recentes demonstram que parte desses efeitos já é irreversível, sendo necessária a redução brusca das emissões de gases do efeito estufa e a substituição de atividades poluidoras por aquelas de características sustentáveis. Devido ao carbono estocado, o solo das florestas tropicais se caracteriza como importante ferramenta para a manutenção do equilíbrio climático. No entanto, a degradação dos ambientes florestais pode resultar em uma maior liberação de carbono, impulsionando os efeitos adversos na regulação do clima. O manejo florestal sustentável emerge como uma forma de ajustar as atividades de exploração de recursos florestais com o desenvolvimento sustentável. Neste contexto, o corte seletivo de madeira de impacto reduzido pode aliar o benefício econômico da atividade madeireira com a conservação das florestas tropicais, sendo de especial interesse para a região amazônica. O objetivo deste estudo foi estimar os efeitos do corte seletivo de madeira de impacto reduzido nos atributos e estoque de carbono no solo de florestas na Amazônia Brasileira. Para isso, cinco áreas com diferentes idades desde a exploração madeireira (dois, três, doze, dezessete e vinte e sete anos) e uma área não explorada foram amostradas quanto às concentrações de carbono orgânico, estoque de carbono e densidade do solo, além de outros 20 atributos. Ao todo, 300 amostras foram coletadas em 150 pontos amostrais com duas camadas de profundidade (0 a 15 cm, e 15 a 30 cm). Amostras indeformadas foram obtidas a partir de anéis volumétricos para estimativas de densidade do solo, e amostras deformadas foram utilizadas para as estimativas de concentrações de carbono orgânico, por meio do método de oxidação por via úmida. O estoque de carbono orgânico do solo foi estimado a partir dos valores de carbono orgânico e densidade do solo. A dimensionalidade dos atributos do solo foi reduzida a partir de Análise de Componentes Principais, e o número de componentes interpretados foi selecionado através do método de broken stick. Os efeitos do tempo desde a exploração madeireira nas concentrações de carbono no solo foram testados a partir de modelos de ANOVA e testes de correlação de Spearman, enquanto os efeitos em escala local da distância de árvores exploradas nas características do solo foram testados por teste de Wilcoxon. Os resultados sugerem que o estoque de carbono no solo em locais próximos e distantes de árvores exploradas são similares. Apesar de existirem diferenças nos atributos do solo entre áreas de estudo, essas diferenças não refletem gradientes ambientais possivelmente gerados pelos impactos da atividade madeireira.

**Palavras-chave:** Estoque de carbono; Desenvolvimento sustentável; Impactos ambientais; Manejo florestal sustentável; Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

The impacts of human activities are leading to climate change on the planet. Recent studies have shown that some of these effects are already irreversible, requiring a sharp reduction in greenhouse gas emissions and the replacement of polluting activities with sustainable ones. Due to the carbon stored, the soil of tropical forests is an important tool for maintaining climate balance. However, the degradation of forest environments can result in a greater release of carbon, driving adverse effects on climate regulation. Sustainable forest management is emerging as a way to adjust forest resource exploitation activities to sustainable development. In this context, selective logging of reduced-impact timber can combine the economic benefits of logging with the conservation of tropical forests, and is of particular interest to the Amazon region. The objective of this study was to estimate the effects of selective logging of reduced-impact timber on the attributes and carbon stocks in the soil of forests in the Brazilian Amazon. For this purpose, five areas with different ages since logging (two, three, twelve, seventeen and twenty-seven years) and one unlogged area were sampled for organic carbon concentrations, carbon stock and soil density, in addition to 20 other attributes. In total, 300 samples were collected at 150 sampling points with two depth layers (0 to 15 cm, and 15 to 30 cm). Undisturbed samples were obtained from volumetric rings for soil density estimation, and disturbed samples were used for organic carbon concentration estimation, using the wet oxidation method. Soil organic carbon stock was estimated from organic carbon and soil density values. The dimensionality of soil attributes was reduced using Principal Component Analysis, and the number of interpreted components was selected using the broken stick method. The effects of time since logging on soil carbon concentrations were tested using ANOVA models and Spearman correlation tests, while the local-scale effects of distance from harvested trees on soil characteristics were tested using the Wilcoxon test. The results suggest that soil carbon stocks in sites close to and far from harvested trees are similar. Although there are differences in soil attributes between study areas, these differences do not reflect environmental gradients possibly generated by the impacts of logging activities.

**Keywords:** Carbon stock; Sustainable development; Environmental impacts; Sustainable forest management; Climate change.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>           | <b>9</b>  |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                | <b>11</b> |
| <b>APRESENTAÇÃO .....</b>               | <b>13</b> |
| <b>1 CAPÍTULO I .....</b>               | <b>15</b> |
| <b>INTRODUCTION .....</b>               | <b>18</b> |
| 1.1 Material and Methods .....          | 20        |
| 1.2 Results .....                       | 21        |
| 1.3 Discussion.....                     | 24        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                | <b>26</b> |
| <b>2 CAPÍTULO II.....</b>               | <b>30</b> |
| <b>INTRODUÇÃO .....</b>                 | <b>33</b> |
| 2.1 Material e Métodos .....            | 35        |
| 2.1.1 Área de estudo .....              | 35        |
| 2.1.2 Coleta de dados.....              | 36        |
| 2.1.3 Procedimentos laboratoriais ..... | 37        |
| 2.1.4 Análise dos dados .....           | 38        |
| 2.2 Resultados.....                     | 39        |
| 2.3 Discussão .....                     | 43        |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                | <b>45</b> |

## INTRODUÇÃO GERAL

A Amazônia brasileira é reconhecida mundialmente por sua elevada biodiversidade e pela abundância de seus recursos naturais, além de fornecer serviços ambientais essenciais, como a regulação climática e a manutenção de processos biológicos (Higuchi; Higuchi, 2012). Apesar de sua grande importância, a floresta tem sido impactada por atividades humanas que contribuem para a degradação dos recursos florestais, como exploração madeireira, desmatamento e queimadas (Barreto *et al.*, 2005). Essas atividades têm contribuído para um cenário no qual a região passa a atuar mais como fonte de emissão de gases de efeito estufa, em vez de funcionar como sumidouro de carbono (Covey *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, a necessidade de minimizar os impactos nos ecossistemas exige a adaptação das próprias atividades humanas. Iniciativas que promovam a conservação das florestas tropicais são fundamentais para o equilíbrio climático global, visto que essas florestas armazenam uma concentração expressiva de carbono na forma de biomassa (Mitchard, 2018). Uma parte desse elemento é incorporado ao solo na forma de matéria orgânica, onde passa por processos de decomposição. Evidências indicam que solos de florestas tropicais conservadas apresentam um balanço positivo de carbono, contribuindo para o sequestro desse elemento (IPCC, 2019). Dessa forma, a manutenção dos estoques de carbono nos solos florestais pode ser fundamental para ajudar a combater às mudanças climáticas.

O manejo florestal sustentável emerge como uma forma de exploração que busca minimizar os impactos no ambiente, permitindo a geração de benefícios a partir da exploração dos ecossistemas naturais (Kumar *et al.*, 2021). Esta atividade tem como princípio garantir o desenvolvimento sustentável de produtos florestais sem ameaçar a qualidade da floresta, sua composição e diversidade, seus processos e serviços ecológicos (Sabogal *et al.*, 2006; Nogueira *et al.*, 2011), evitando danos ao solo e ao dossel remanescente (Lentini; Zeweed; Holmes, 2010). Com o objetivo de explorar as florestas de forma sustentável e reduzir os impactos causados pela exploração madeireira, a adoção do plano de manejo florestal vem sendo uma alternativa política e ambientalmente correta na Amazônia (Garrido Filha, 2002), promovendo a conservação dos recursos naturais e possibilitando o uso racional dos recursos madeireiros (Pinto *et al.*, 2002).

A exploração e o processamento de madeira figuram entre as principais atividades econômicas da Amazônia, devido ao elevado potencial da região para a produção de recursos madeireiros (Barros; Verríssimo, 2002). O corte seletivo de madeira de impacto reduzido, inserido no contexto do manejo florestal sustentável, visa minimizar os impactos ambientais.

Essa prática envolve a seleção criteriosa de árvores de interesse, a exploração de volume limitado de madeira, com ciclo de corte inicial de 35 anos, e o planejamento das vias de acesso, remoção das toras e das atividades em campo (Werger, 2011). O objetivo é permitir que o ecossistema florestal mantenha sua capacidade de regeneração, permitindo a exploração dos benefícios para a atual e futuras gerações. Assim, o corte seletivo de impacto reduzido alinha-se aos princípios do desenvolvimento sustentável (Swamy *et al.*, 2017)

O corte seletivo de impacto reduzido pode promover a manutenção dos estoques de carbono no solo de florestas tropicais, por meio da redução dos efeitos negativos associados à exploração madeireira. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do manejo florestal sustentável, a partir de estimativas dos efeitos do corte seletivo de madeira de impacto reduzido nos atributos e estoque de carbono no solo de florestas na Amazônia brasileira. Ainda, como objetivos deste trabalho: i) realizamos amostragens de solo em áreas de Floresta Amazônica com diferentes idades desde o corte seletivo de impacto reduzido; ii) caracterizamos os atributos do solo nas áreas de estudo; iii) determinamos a densidade do solo e a concentração de carbono orgânico e fizemos a estimativa do estoque de carbono nas amostras de solo coletadas; iv) testamos os efeitos do tempo após a exploração madeireira nas concentrações de carbono orgânico, nos atributos e estoque de carbono no solo nas áreas de estudo; e v) testamos os efeitos da proximidade com árvores exploradas nas concentrações de carbono orgânico e estoque de carbono no solo.

## REFERÊNCIAS

- BARRETO, P.; SOUZA JUNIOR, C.; ANDERSON, A.; SALOMÃO, R.; WILES, J. Pressão humana no bioma amazônia. **Imazon**, n. 3, 2005
- BARROS, A. C.; VERÍSSIMO, A. **A expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o desenvolvimento sustentável no Pará**. 2º ed. Belém: Imazon, 2002.
- COVEY, K.; SOPER, F.; PANGALA, S.; BERNARDINO, A.; PAGLIARO, Z.; BASSO, L.; CASSOL, H.; FEARNSIDE, P.; NAVARRETE, D.; NOVOA, S.; SAWAKUCHI, H.; LOVEJOY, T.; MARENGO, J.; PERES, C. A.; BAILLIE, J.; BERNASCONI, P.; CAMARGO, J.; FREITAS, C.; HOFFMAN, B.; NARDOTO, G. B.; NOBRE, I.; MAYORGA, J.; MESQUITA, R.; PAVAN, S.; PINTO, F.; ROCHA, F.; MELLO, R. A.; THUAULT, A.; BAHL, A. A.; ELMORE, A. Carbon and beyond: the biogeochemistry of climate in a rapidly changing amazon. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, p. 11, 2021. DOI: 10.3389/ffgc.2021.618401
- GARRIDO FILHA, I. Manejo florestal: questões econômico-financeiras e ambientais. **Estudos Avançados - USP**, São Paulo, v. 16, n. 45, p. 91-106, 2002.
- HIGUCHI, M. I. G.; HIGUCHI, N. **A floresta amazônica e suas múltiplas dimensões: uma proposta de educação ambiental**. 2º. ed. Manaus: [s.n.] 2012.
- KUMAR, D.; THAKUR, C. L.; BHARDWAJ, D. R.; SHARMA, N.; SHARMA, H.; SHARMA, P. Sustainable forest management a global review. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 10, n. 01, p. 2521-2528, 2021. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2021.1001.292>
- LENTINI, M. W.; ZEWEED, J. C.; HOLMES, T. P. Measuring ecological impacts from logging in natural forests of the eastern amazônia as a tool to assess forest degradation. **Forest Resources Assessment Working Paper**, v. 165, p. 1-9, 2010.
- MITCHARD, E. T. A. The tropical forest carbon cycle and climate change. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 527-534, 2018. DOI: 10.1038/s41586-018-0300-2
- NOGUEIRA, M. M.; VIEIRA, V.; SOUZA, A. de; LENTINI, M. W. **Manejo de florestas naturais da Amazônia: corte, traçamento e segurança**. Belém: Instituto Floresta Tropical, 2011.
- PINTO, A. C. M.; SOUZA, A. L. de; SOUZA, A. P. de; MACHADO, C. C.; MINETTE, L. J.; VALE, A. B. do. Análise de danos de colheita de madeira em floresta tropical úmida sob regime de manejo florestal sustentado na Amazônia Ocidental. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4, p. 459-466, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000400008>
- SABOGAL, C.; LENTINI, M.; POKORNY, B.; SILVA, J. N. M.; ZWEED, J.; VERÍSSIMO, A.; BOSCOLO, M. **Manejo florestal empresarial na Amazônia brasileira: restrições e oportunidades**. Belém: CIFOR, 2006.

SWAMY, L.; DRAZEN, E.; JOHNSON, W. R.; BUKOSKI, J. J. The future of tropical forests under the United Nations sustainable development goals. **Journal of Sustainable Forestry**, v. 37, n. 2, p. 221-256, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2017.1416477>

THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. Switzerland: IPCC, 2019.

WERGER, M. J. A. **Sustainable management of tropical rainforests**. Paramaribo: Tropenbos International, 2011.

## **APRESENTAÇÃO**

Esta dissertação dispõe de dois capítulos apresentados em forma de artigo científico. Ambos os capítulos são de co-autoria de Louri Klemann Júnior, Luís Antônio Coutrim dos Santos, Ricardo Augusto Serpa Cerboncini e Talita Vieira Braga.

## LISTAS DE FIGURAS

### Capítulo I

|  |    |
|--|----|
| Figure 1 - Location of the study area in the Central Brazilian Amazon.....   | 19 |
| Figure 2 - Soil organic carbon concentration, bulk density, and soil organic carbon stock in sample points near logged tree species (ca. 5 m of <i>Sextonia rubra</i> , <i>Manilkara elata</i> , and <i>Caryocar villosum</i> ) and far (at least 50 m) from any logged tree in a reduced impact-logging site in Central Brazilian Amazon.....   | 21 |
| Figure 3 - Paired differences between upper and lower layers estimates of soil organic carbon, bulk density, and soil organic carbon stocks in sample points near logged tree species (ca. 5 m of <i>Sextonia rubra</i> , <i>Manilkara elata</i> , and <i>Caryocar villosum</i> ) and far (at least 50 m) from any logged tree in a reduced-impact logging site in Central Brazilian Amazon..... | 22 |

### Capítulo II

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Localização das áreas exploradas e não explorada nas áreas de estudo na Amazônia Brasileira.....   | 34 |
| Figura 2 - (A) Porcentagens da variância explicadas pelos componentes da camada A e (B) porcentagens da variância explicadas pelos componentes da camada B..... | 38 |
| Figura 3 - Gráficos de biplot da camada A (A) componentes 1 e 2 e (B) 3 e 4.....  | 39 |
| Figura 4 - Gráficos de biplot da camada B: (A) componentes 1 e 2 (B) 3 e 4 (C) 5 e 6.....   | 40 |

## **1 CAPÍTULO I**

**A SHORT-TERM LOCAL APPROACH TO TEST THE EFFECTS OF REDUCED-IMPACT SELECTIVE LOGGING ON AMAZONIAN FOREST SOIL CARBON STOCKS**

## ABSTRACT

Soil carbon stocks are fundamental to world climate regulation. Reduced-impact logging (RIL) is one of the most important economic activities aiming at the sustainable development of the Amazonian region, but its effects on environmental quality and ecological processes are understudied. We used a local-scale approach to test the short-term effects of RIL on soil organic carbon, soil bulk density, and soil organic carbon stocks. We collected soil samples in 30 points two years after logging in an Amazonian forest site. Half of the sampling points were located near ( $< 5$  m) harvested trees and the remaining points were located far (at least 50 m) from any logged tree. Therefore, we focused on measuring the potential effects of changes in the local environment after logging. Our results show no evidence of short-term local-scale effects of RIL on soil estimates.

**Keywords:** Carbon cycle; Central brazilian Amazonia; Climate change; Ecological changes; Environmental impacts.

## RESUMO

Os estoques de carbono do solo são fundamentais para a regulação do clima mundial. A exploração madeireira de impacto reduzido (EIR) é uma das atividades econômicas mais importantes que visa o desenvolvimento sustentável da região amazônica, mas seus efeitos na qualidade ambiental e nos processos ecológicos são pouco estudados. Usamos uma abordagem em escala local para testar os efeitos de curto prazo da EIR no carbono orgânico do solo, na densidade aparente do solo e nos estoques de carbono orgânico do solo. Coletamos amostras de solo em 30 pontos dois anos após a exploração madeireira em um local de floresta amazônica. Metade dos pontos de amostragem estava localizado perto ( $< 5$  m) de árvores colhidas e os pontos restantes estavam localizados longe (pelo menos 50 m) de qualquer árvore explorada. Portanto, nos concentramos em medir os efeitos potenciais das mudanças no ambiente local após a exploração madeireira. Nossos resultados não mostraram evidências de efeitos de curto prazo em escala local da EIR nas estimativas do solo.

**Palavras-chave:** Ciclo do carbono; Amazônia central brasileira; Mudanças climáticas; Mudanças ecológicas; Impactos ambientais.

## INTRODUCTION

The destruction of tropical forests threatens life on Earth and may lead to the rapid extinction of species (Bologna; Aquino, 2020). Deforestation and environmental degradation result in the imminent loss of biomass carbon stock and the consequent loss of soil carbon stocks (Nogueira *et al.*, 2015; Assis *et al.*, 2020). The liberation of these carbon sources to the atmosphere has increased the rate of climate change, leading to extreme conditions in several parts of the world, including the Amazonian region (Oliveira *et al.*, 2021; Artaxo *et al.*, 2022). In turn, forest fires became more common in the Amazon Forest, accelerating the process of the release of carbon stocks (Le Roux *et al.*, 2022).

While agribusiness is the main driver of deforestation in Amazonia (dos Santos *et al.*, 2021), reduced-impact logging (RIL) is proposed as an economical and social alternative for the development of tropical countries (Putz *et al.*, 2008). RIL aims at the sustainable exploitation of wood from tropical forests by planning activities to minimize the environmental impacts, such as limiting the volume of logged wood per area, rotating managed sites on more than years cycles, and planning the direction of tree fall and the construction of draglines (Jonkers; Hendrison, 2011). Studies on the impacts of RIL on the forest traits and ecological processes, wildlife, and streams suggest that lower logging intensity and longer logging cycles would improve the conservation of the Amazon forest in the long run (DeArmond *et al.*, 2023).

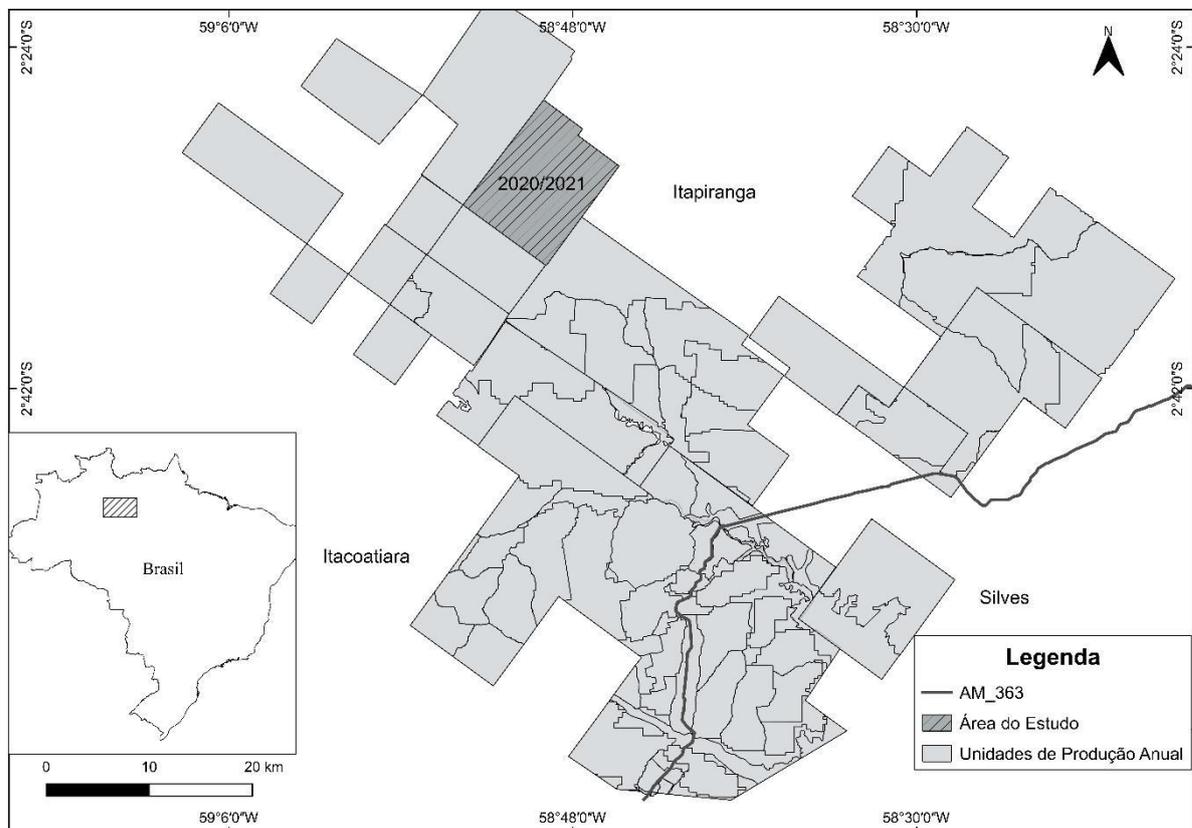
The majority of studies on carbon stocks in the Amazon focus on the above-ground biomass, while soil carbon stock is an understudied theme (Araujo *et al.*, 2023; DeArmond *et al.*, 2023). Soil carbon stocks intensely decreased in selectively logged sites in tropical forests of Africa (Chiti *et al.* 2016; Lontsi *et al.*, 2019), making it crucial to evaluate potential RIL impacts in other tropical lands. As RIL impacts can be pervasive as logging sites usually extend over large areas, the impacts on ecological processes that occur locally may result in widespread effects. For example, tree fall may increase over large areas after logging due to damage to unharvested trees (Feldpausch *et al.*, 2005; Behjou; Mollabashi, 2012) and increased solar and wind conditions (Lindenmayer *et al.*, 2018). If the combined logging disturbances affect microbial activity, altering soil composition and possibly changing nutrient cycling (Jiang; Ushio; Kitayama, 2023), increased carbon release from the soil stock may accelerate climate change (Goldstein *et al.*, 2020; Nottingham *et al.*, 2020). Therefore, understanding the effects of RIL on local-scale processes may allow us to understand larger-scale effects and adjust logging activities to minimize those impacts.

Soil organic carbon stocks (SOC stocks) can rapidly change after environmental impacts, such as in croplands (Fujizaki *et al.*, 2015). While plant growth can increase carbon assimilation into biomass, degraded forests may increase microbial activity in soils and, consequently, increase organic carbon release from soil stocks (Zhou; Wang; Luo, 2018). Thus, we hypothesize that local environmental changes after RIL may alter the soil microbiota, potentially affecting SOC stocks. If RIL practices minimize the impacts successfully, we expect SOC stocks to remain similar in points near and far from logged trees. To assess this potential effect of RIL, we tested whether the concentration of organic carbon, bulk density, and SOC stocks differed between samples taken near and far from harvested trees in a RIL site in Central Brazilian Amazonia.

## 1.1 Material and Methods

The study site is within a group of areas destined for RIL comprising more than 281,200 ha in the municipalities of Itapiranga, Silves, and Itacoatiara, in the state of Amazonas, Brazil. The size of the study site is 12,236 ha and RIL practices occurred in 2020, two years before data collection. Vegetation is the evergreen rainforest (“Floresta Pluvial Tropical de Terra Firme”) with the occurrence of woody lianas (Oliveira *et al.*, 2008). The climate is rainy and warm most of the year (type Af following Köppen classification), with a short dry season of approximately three months (Kottek *et al.*, 2006) (Figure 1).

Figure 1 – Location of the study area in the central Brazilian amazon



We distributed sampling points based on the proximity of logged trees. For that purpose, we had access to the logging company data about all harvested trees in the study site and selected three species among the most common harvested trees in the study site: *Sextonia rubra* (Allemão ex Miq.) Monach., *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach., and *Caryocar villosum* (Aubl.) Pers., 1806. These species also represent variation in the volume of individual harvested trees, as *C. vilosum* is one of the species with the greatest volume harvested per

individual tree, *S. rubra* had a lower harvested volume per individual, and *M. elata* had an intermediate volume. We then selected fifteen trees, five of each species, and defined one sampling point near each tree. In the field, we identified the location of logged trees and collected the soil samples in ca. 5 m of the stump, avoiding draglines and the location impacted by the felled tree. Therefore, we avoided measuring the impact of those disturbances already known to increase soil compaction (DeArmond *et al.*, 2019) and focused on measuring possible effects related to ecological changes after logging. We selected another fifteen points in locations without any logged trees in a 50 m radius. We collected soil samples at each sampling point in two depths: from 0 to 15 cm (hereafter upper layer), and from 15 to 30 cm (hereafter lower layer). Undisturbed soil samples were collected using cylinders of known volume. The concentration of soil organic carbon (SOC in  $\text{g.kg}^{-1}$ ) was determined by the wet oxidation method, while bulk density (BD in  $\text{kg.dm}^{-3}$ ) by the volumetric ring method (following Teixeira *et al.*, 2017). SOC stocks (in  $\text{g.dm}^{-3}$ ) were calculated by multiplying SOC and BD. Although many studies calculate SOC stocks per area for a given layer in  $\text{Mg.ha}^{-1}$ , usually to compare larger areas or to estimate stocks from an entire region (Cerri *et al.*, 2007; Marques *et al.*, 2015; Barros; Fearnside, 2019), we opted for a more straightforward calculation due to the small-scale approach of our study (the estimates can be easily transformed into  $\text{Mg.ha}^{-1}$  for the entire layer by multiplying SOC stocks by 1.5).

To test the impacts of RIL on a local scale, we compared SOC, BD, and SOC stocks in sample points near and far from logged trees by using the Wilcoxon rank-sum test. Statistical tests were run separately for each depth layer. To estimate differences between layers, we calculated the paired difference in estimates between layers in the same sampling point and used the Wilcoxon signed-rank test. Finally, to test if the paired differences were dependent on the proximity to logged trees, we used the Wilcoxon rank-sum test. Descriptive statistics in the results are medians (M) and interquartile ranges (IR). Paired differences were calculated as the estimate in the upper layer minus the estimate in the lower layer.

## 1.2 Results

In both the upper layer (SOC: M = 19.29, IR = 17.30 to 23.85, W = 109.5, p = 0.917; DS: M = 1.16, IR = 1.11 to 1.22, W = 148, p = 0.149; SOC stocks: M = 22.10, IR = 20.70 to 27.46, W = 130, p = 0.486) and the lower layer (SOC: M = 10.91, IR = 10.11 to 13.71, W = 109.5, p = 0.917; DS: M = 1.33, IR = 1.28 to 1.39, W = 148, p = 0.149; SOC stocks: M = 14.73, IR = 13.51 to 17.18, W = 130, p = 0.486), soil estimates were independent of the proximity to

logged trees (Figure 2). SOC was greater in the upper layer ( $M = 8.23$ ,  $IR = 5.33$  to  $11.67$ ,  $V = 429$ ,  $p < 0.001$ ), while DS was greater in the lower layer ( $M = -0.18$ ,  $IR = -0.25$  to  $-0.13$ ,  $V = 0$ ,  $p < 0.001$ ). SOC stocks were greater in the upper layer ( $M = 6.55$ ,  $IR = 2.09$  to  $11.80$ ,  $V = 389$ ,  $p < 0.001$ ). The paired difference between layers was independent of the proximity from logged trees (SOC:  $W = 116$ ,  $p = 0.903$ ; DS:  $W = 113$ ,  $p > 0.999$ ; SOC stocks:  $W = 125$ ,  $p = 0.624$ ; Figure 3).

Figure 2 - Soil organic carbon concentration, bulk density, and soil organic carbon stock in sample points near logged tree species (ca. 5 m of *Sextonia rubra*, *Manilkara elata*, and *Caryocar villosum*) and far (at least 50 m) from any logged tree in a reduced impact-logging site in Central Brazilian Amazon

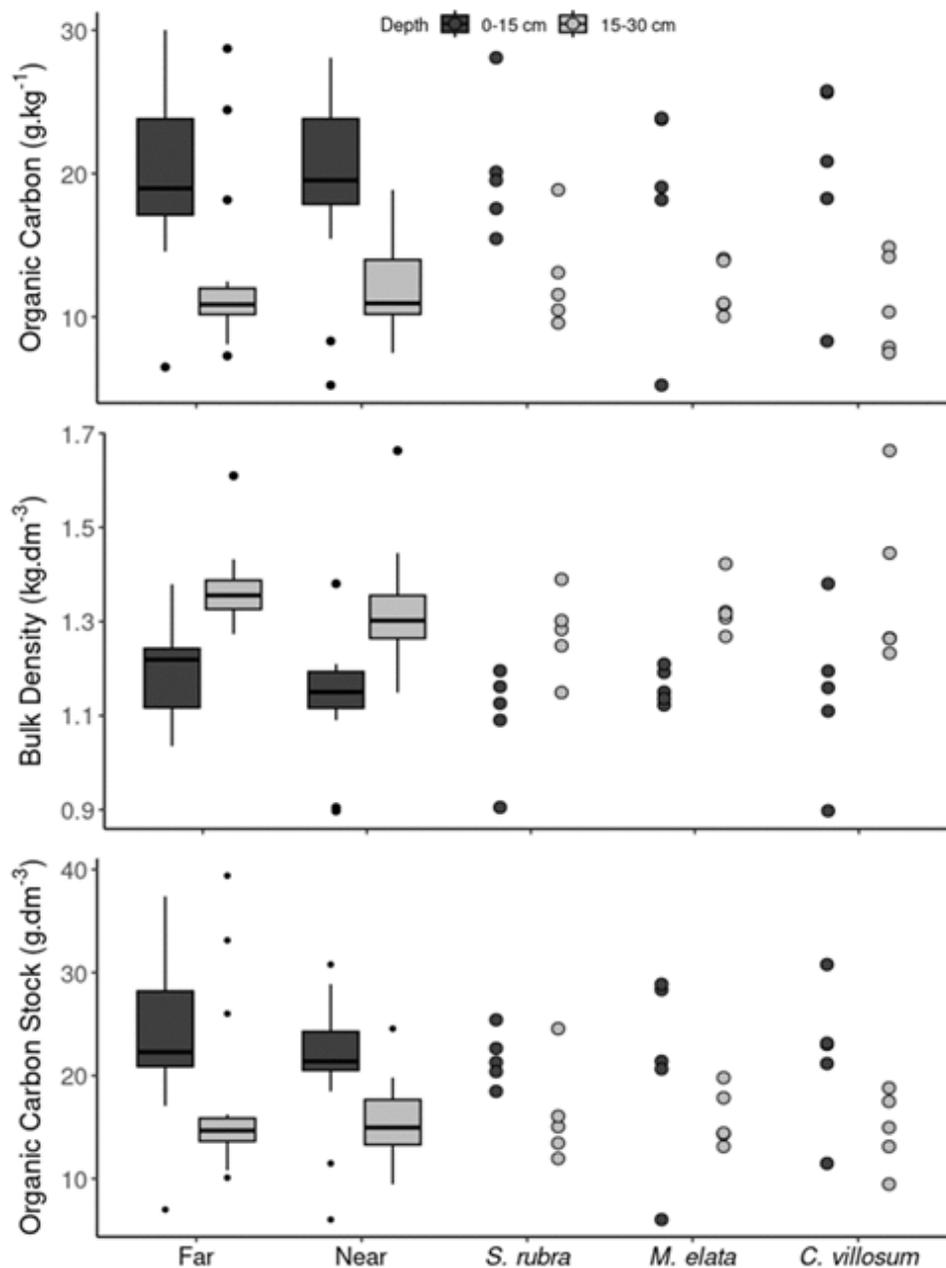
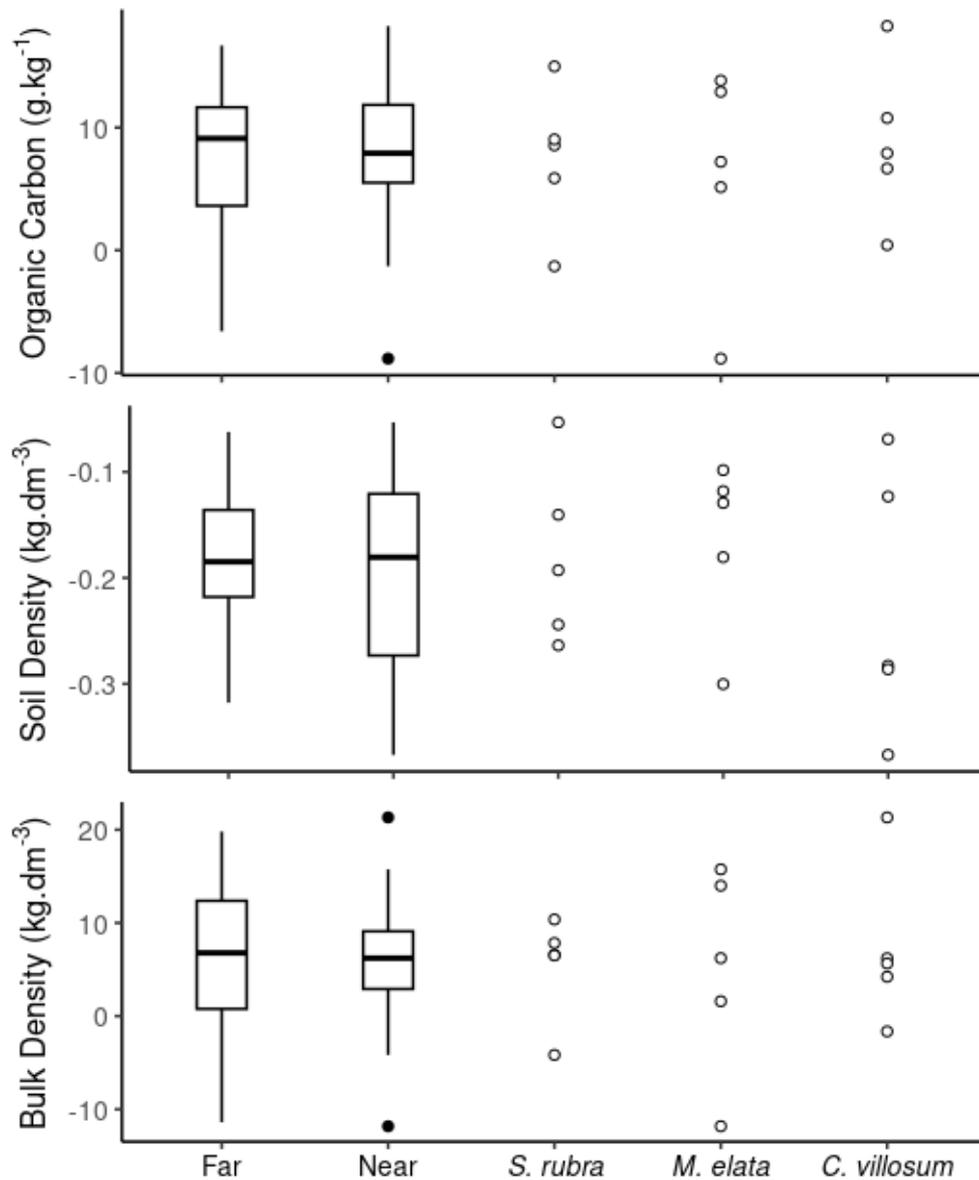


Figure 3 - Paired differences between upper and lower layers estimates of soil organic carbon, bulk density, and soil organic carbon stocks in sample points near logged tree species (ca. 5 m of *Sextonia rubra*, *Manilkara elata*, and *Caryocar villosum*) and far (at least 50 m) from any logged tree in a reduced-impact logging site in Central Brazilian Amazon



### 1.3 Discussion

The proximity to logged trees had no significant short-term local effects on SOC stocks. After logging, increased amounts of plant materials in the litter and changes in microbial activity and microclimate could consequently affect organic carbon inputs (Chiti *et al.*, 2016; Lindenmayer *et al.*, 2018). If that was the case, we expected to detect local differences in SOC due to the proximity to logged trees, which did not happen. Nevertheless, our results should be considered with caution as we focused on detecting very short-term effects. Changes in SOC are usually intense in the first years after the substitution of forest sites by plantations and other anthropogenic activities (Solomon *et al.*, 2007; Fujizaki *et al.*, 2015). RIL, however, may successfully minimize these impacts, or produce detectable effects only after many years.

The lack of significant effects may also indicate that the premise of increased litter deposition after logging is wrong. Another study in nearby areas in the same study region indicated no significant effects on litter deposition in sites from one to 15 years after logging (Barreiros *et al.*, 2022). Thus, micro-climatic changes after logging may not necessarily lead to increased availability of organic materials to be decomposed in the soil. Also, although RIL clearings are expected to be larger than natural gaps (Felton *et al.*, 2006), it is possible that such differences, if existent in the study site, did not result in significant short-term differences in ecological processes related to carbon input in the soil.

Logging intensity in the study site is low (average 16.8 m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>, Barreiros *et al.*, 2022), which may also contribute to the lack of effects detected in this study. As logging intensity increases, the effects of tree gaps and pioneer species development can lead to decreased SOC (Olander *et al.*, 2005; Chiti *et al.*, 2016; Lontsi *et al.*, 2019). Nevertheless, these effects were detected by comparing multiple sites over decades. In our study site, the limitations in logging intensity may have haltered the intensity of these impacts and the likelihood of detecting short-term local changes in SOC. Furthermore, local effects in BD, usually detected in skidder trails and drag lines soon after tree fall (Olander *et al.*, 2005, Nazari *et al.*, 2021) were avoided by our sample design. The potential changes in ecological processes that could affect soil carbon assimilation and emission were not detected in our analysis. Consequently, SOC stocks remained similar between samples taken near and far from logged trees.

RIL practices are known to minimize impacts on several aspects of biodiversity, usually with temporary effects in animals (Azevedo-Ramos; Carvalho Junior; Amaral, 2006; Ribeiro; Freitas, 2012; Soares *et al.*, 2021, Moura *et al.*, 2021), plants (Schwartz *et al.* 2012; DeArmond

*et al.* 2022), and ecological processes (Barreiros *et al.*, 2022; Lima; Tonello, 2023). Our results show a similar trend and suggest undetectable very short-term local effects of RIL on SOC stocks. We encourage researchers to develop further studies on the effects of RIL on SOC stocks in the Amazon region, with between and within-site comparisons and the detection of short and long-term effects.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. C. G.; SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; PELISSARI, A. L.; ORSO, G. A.; SILVA, T. C. Global review and state-of-the-art of biomass and carbon stock in the Amazon. **Journal of Environmental Management**, v. 331, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117251>
- ARTAXO, P.; HANSSON, H. C.; MACHADO, L. A. T.; RIZZO, L. V. Tropical forests are crucial in regulating the climate on Earth. **PLOS Climate**, v. 1, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000054>
- ASSIS, T. O.; AGUIAR, A. P. D. de; VON RANDOW, C.; GOMES, D. M. de P.; KURY, J. N.; OMETTO, J. P. H.; NOBRE, C. A. CO<sub>2</sub> emissions from forest degradation in Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9cfc>
- AZEVEDO-RAMOS, C.; CARVALHO JUNIOR, O.; AMARAL, B. D. do. Short-term effects of reduced-impact logging on eastern Amazon fauna. **Forest Ecology and Management**, v. 232, n. 1-3, p. 26-35, 2006. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.05.025
- BARREIROS, J. L.; OLIVEIRA, N. S.; CERBONCINI, R. A.; KLEMMANN JUNIOR, L. Does selective logging affect litter deposition rates in central Brazilian Amazonia? **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 94, 2022. DOI: 10.1590/0001-376520220201654
- BARROS, H. S.; FEARNSIDE, P. M. Soil carbon is decreasing under “undisturbed” Amazonian forest. **Soil Science Society of America Journal**, v. 83, n. 6, p. 1779-1785, 2019. DOI: 10.2136/sssaj2018.12.0489
- BEHJOU, F. K.; MOLLABASHI, O. G. Selective logging and damage to unharvested trees in a Hyrcanian forest of Iran. **BioResources**, v. 7, n. 4, 2012.
- BOLOGNA, M.; AQUINO, G. Deforestation and world population sustainability: a quantitative analysis. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63657-6>
- CERRI, C. E. P.; EASTER, M.; PAUSTIAN, K.; KILLIAN, K.; COLEMAN, K.; BERNOUX, M.; FALLOON, P.; POWLSON, D. S.; BATJES, N. H.; MILNE, E.; CERRI, C. C. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 122, n. 1, p. 58-72, 2007. DOI: 10.1016/j.agee.2007.01.008
- CHITI, T.; PERUGINI, L.; VESPERTINO, D.; VALENTINI, R. Effect of selective logging on soil organic carbon dynamics in tropical forests in central and western Africa. **Plant and Soil**, v. 399, p. 283-294, 2016. DOI: 10.1007/s11104-015-2697-9
- DEARMOND, D.; EMMERT, F.; LIMA, A. J. N.; HIGUCHI, N. Impacts of soil compaction persist 30 years after logging operations in the Amazon Basin. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 207-216, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.010>

DEARMOND, D.; EMMERT, F.; PINTO, A. C.; LIMA, A. J.; HIGUCHI, N. A systematic review of logging impacts in the amazon biome. **Forests**, v. 14, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14010081>

DEARMOND, D.; FERRAZ, J. B. S.; MARRA, D. M.; AMARAL, M. R. M.; LIMA, A. J. N.; HIGUCHI, N. Logging intensity affects growth and lifespan trajectories for pioneer species in Central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 522, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120450>

FELDPAUSCH, T. R.; JIRKA, S.; PASSOS, C. A.; JASPER, F.; RIHA, S. J. When big trees fall: damage and carbon export by reduced impact logging in southern Amazonia. **Forest Ecology and Management**, v. 219, n. 2-3, p. 199-215, 2005. DOI: [10.1016/j.foreco.2005.09.003](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.09.003)

FELTON, A.; FELTON, A. M.; WOOD, J.; LINDENMAYER, D. B. Vegetation structure, phenology, and regeneration in the natural and anthropogenic tree-fall gaps of a reduced-impact logged subtropical Bolivian forest. **Forest Ecology and Management**, v. 235, n. 1-3, p. 186-193, 2006. DOI: [10.1016/j.foreco.2006.08.011](https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.011)

FUJISAKI, K.; PERRIN, A. S.; DESJARDINS, T.; BERNOUX, M.; BALBINO, L. C.; BROSSARD, M. From forest to cropland and pasture systems: a critical review of soil organic carbon stocks changes in Amazonia. **Global Change Biology**, v. 21, n. 7, p. 2773-2786, 2015. DOI: [10.1111/gcb.12906](https://doi.org/10.1111/gcb.12906)

GOLDSTEIN, A.; TURNER, W. R.; SPAWN, S. A.; ANDERSON-TEIXEIRA, K. J.; COOK-PATTON, S.; FARGIONE, J.; GIBBS, H. K.; GRISCOM, B.; HEWSON, J. H.; HOWARD, J. F.; LEDEZMA, J. C.; PAGE, S.; KOH, L. P.; ROCKSTRÖM, J.; SANDERMAN, J.; HOLE, D. G. Protecting irrecoverable carbon in Earth's ecosystems. **Nature Climate Change**, v. 10, n. 4, p. 287-295, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0738-8>

JIANG, L.; USHIO, M.; KITAYAMA, K. Changes of soil chemical properties, microbial biomass and enzymatic activities along a gradient of forest degradation in logged over tropical rain forests, Borneo. **Plant and Soil**, v. 485, n. 1-2, p. 525-536, 2023. DOI: [10.1007/s11104-022-05848-w](https://doi.org/10.1007/s11104-022-05848-w)

JONKERS, W. B. J.; HENDRISON, J. The CELOS management system: concept, treatments and costs. In: WERGER, M. J. A. **Sustainable Management of Tropical Rainforests**. Paramaribo: Tropenbos International, 2011. p. 29-45

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006. DOI: [10.1127/0941-2948/2006/0130](https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130)

LE ROUX, R.; WAGNER, F.; BLANC, L.; BETBEDER, J.; GOND, V.; DESSARD, H.; FUNATZU, B.; BOURGOIN, C.; CORNU, G.; HERAULT, B.; MONTFORT, F.; SIST, P.; BEGUE, A.; DUBREUIL, V.; LAURENT, F.; MESSNER, F.; HASAN, A. F.; ARVOR, D. How wildfires increase sensitivity of Amazon forests to droughts. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5b3d>

LIMA, J. A. de; TONELLO, K. C. Rainfall partitioning in amazon forest: implications of reduced impact logging for hydrological processes. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 337, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109505>

LINDENMAYER, D. B.; BLANCHARD, W.; BLAIR, D.; MCBURNEY, L.; STEIN, J.; BANKS, S. C. Empirical relationships between tree fall and landscape-level amounts of logging and fire. **PLoS One**, v. 13, n. 2, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0193132>

LONTSI, R. T.; CORRE, M. D.; VAN STRAATEN, O.; VELDKAMP, E. Changes in soil organic carbon and nutrient stocks in conventional selective logging versus reduced-impact logging in rainforests on highly weathered soils in southern Cameroon. **Forest Ecology and Management**, v. 451, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117522>

MARQUES, J. D. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; SARRAZIN, M.; FERREIRA, S. J. F.; BELDINI, T. P.; MARQUES, E. M. A. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central Amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 232-242, 2015. DOI: 10.1590/01000683rbc20150142

MOURA, R. S. de; NORIEGA, J. A.; CERBONCINI, R. A. S.; VAZ-DE-MELLO, F. Z.; KLEMMANN JUNIOR, L. Dung beetles in a tight-spot, but not so much: quick recovery of dung beetles assemblages after low-impact selective logging in central brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 494, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119301>

NAZARI, M.; ETEGHADIPOUR, M.; ZAREBANADKOUKI, M.; GHORBANI, M.; DIPPOLD, M. A.; BILYERA, N.; ZAMANIAN, K. Impacts of logging-associated compaction on forest soils: a meta-analysis. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 4, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.780074>

NOGUEIRA, E. M.; YANAI, A. M.; FONSECA, F. O.; FEARNSSIDE, P. M. Carbon stock loss from deforestation through 2013 in brazilian Amazonia. **Global Change Biology**, v. 21, n. 3, p. 1271-1292, 2015. DOI: 10.1111/gcb.12798

NOTTINGHAM, A. T.; MEIR, P.; VELASQUEZ, E.; TURNER, B. L. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest. **Nature**, v. 584, n. 7820, p. 234-237, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2566-4>

OLANDER, L. P.; BUSTAMANTE, M. M.; ASNER, G. P.; TELLES, E.; PRADO, Z.; CAMARGO, P. B. Surface soil changes following selective logging in an eastern Amazon forest. **Earth Interactions**, v. 9, n. 4, p. 1-19, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1175/EI135.1>

OLIVEIRA, A. N. D.; AMARAL, I. L.; RAMOS, M. B. P.; NOBRE, A. D.; COUTO, L. B.; SAHDO, R. M. Composição e diversidade florístico-estrutural de um hectare de floresta densa de terra firme na Amazônia Central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazonica**, v. 38, p. 627-641, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672008000400005>

OLIVEIRA, B. F.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v.2, 2021.

PUTZ, F. E.; SIST, P.; FREDERICKSEN, T.; DYKSTRA, D. Reduced-impact logging: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 7, p. 1427-1433, 2008. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.036

RIBEIRO, D. B.; FREITAS, A. V. L. The effect of reduced-impact logging on fruit-feeding butterflies in central Amazon, Brazil. **Journal of Insect Conservation**, v. 16, p. 733-744, 2012. DOI: 10.1007/s10841-012-9458-3

SANTOS, A. M. dos; SILVA, C. F. A. da; ALMEIDA JUNIOR, P. M. de; RUDKE, A. P.; MELO, S. N. de. Deforestation drivers in the brazilian Amazon: assessing new spatial predictors. **Journal of Environmental Management**, v. 294, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113020>

SCHWARTZ, G.; PEÑA-CLAROS, M.; LOPES, J. C.; MOHREN, G. M.; KANASHIRO, M. Mid-term effects of reduced-impact logging on the regeneration of seven tree commercial species in the Eastern Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 274, p. 116-125, 2012. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.02.028

SOARES, J. C.; AMARAL, A. O.; MOURA, R. S. de; CERBONCINI, R. A.; KLEMANN JUNIOR, L. Effects of low-impact logging on understory birds in the brazilian Amazon. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 14, n. 2, p. 122, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor3435-014>

SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; KINYANGI, J.; AMELUNG, W.; LOBE, I.; PELL, A.; RIHA, S.; NGOZE, S.; VERCHOT, L.; MBUGUA, D.; SKJEMSTAD, J.; SCHÄFER, T. Longterm impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. **Global Change Biology**, v. 13, n. 2, p. 511-530, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01304.x

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. Brasília: Embrapa, 2017.

ZHOU, Z.; WANG, C.; LUO, Y. Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: a global metaanalysis. **Global Ecology and Biogeography**, v. 27, n. 1, p. 110-124, 2018. DOI: 10.1111/geb.12663

## **2 CAPÍTULO II**

**EFEITOS DO CORTE SELETIVO DE MADEIRA DE IMPACTO REDUZIDO NOS ATRIBUTOS E ESTOQUE DE CARBONO DO SOLO DE FLORESTAS NA AMAZÔNIA BRASILEIRA**

## RESUMO

A destruição das florestas tropicais intensifica as mudanças climáticas pela liberação de carbono estocado na biomassa e no solo das florestas. O desastre climático, por sua vez, pode resultar em extinções em massa nas próximas décadas. No contexto do manejo florestal sustentável, o corte seletivo de impacto reduzido pode unir o benefício econômico da atividade madeireira com a conservação florestal, sendo de especial interesse para a região amazônica. O objetivo deste estudo foi estimar os efeitos do corte seletivo de madeira de impacto reduzido nos atributos e estoque de carbono no solo de florestas na Amazônia Brasileira. Para isso, cinco áreas com diferentes idades desde a exploração madeireira (dois, três, doze, dezessete e vinte e sete anos) e uma área não explorada foram amostradas quanto as concentrações de carbono orgânico, estoque de carbono e densidade do solo, além de outros 20 atributos. Ao todo, 300 amostras foram coletadas em 150 pontos amostrais com duas camadas de profundidade (0 a 15 cm, e 15 a 30 cm). Os resultados sugerem que, apesar de existirem diferenças nos atributos do solo entre as áreas de estudo, essas diferenças não refletem gradientes ambientais possivelmente gerados pelos impactos da atividade madeireira. Desta forma, considerando os dados obtidos e as características das áreas de estudo, o manejo florestal de impacto reduzido pode ser considerado uma atividade que minimiza os impactos negativos no equilíbrio climático, uma vez que não altera o estoque de carbono do solo.

**Palavras-chave:** Densidade do solo; Desenvolvimento sustentável; Impactos ambientais; Manejo florestal sustentável; Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

The destruction of tropical forests intensifies climate change by releasing carbon stored in forest biomass and soil. Climate disaster, in turn, could result in mass extinctions in the coming decades. In the context of sustainable forest management, selective logging with reduced impact can combine the economic benefits of logging with forest conservation, and is of particular interest for the Amazon region. The objective of this study was to estimate the effects of selective logging with limited impact on attributes and soil carbon stocks in forests in the Brazilian Amazon. For this purpose, five areas with different ages since logging (two, three, twelve, seventeen and twenty-seven years) and one unlogged area were sampled for organic carbon concentrations, carbon stocks and soil bulk density, in addition to 20 other attributes. In total, 300 samples were collected at 150 sampling points with two depth layers (0 to 15 cm, and 15 to 30 cm). The results suggest that, although there are differences in soil attributes between the study areas, these differences do not reflect environmental gradients possibly generated by the impacts of logging activities. Thus, considering the data obtained and the characteristics of the study areas, forest management can be considered an activity that generates little or no impact on climate balance, since it does not alter soil carbon stocks.

**Keywords:** Soil density; Sustainable development; Environmental impacts, Sustainable forest management, Climate change.

## INTRODUÇÃO

As florestas tropicais concentram a maior parte da biodiversidade do planeta e são responsáveis por serviços ecossistêmicos essenciais (Eguiguren; Fischer; Gunter, 2019). Além disso, possuem papel fundamental para a regulação climática global e para a conservação da biodiversidade (Malhi *et al.*, 2013). Nesse cenário, as florestas tropicais exercem importantes funções sociais, econômicas e ambientais.

A Amazônia Brasileira corresponde a um terço das florestas tropicais do mundo, destacando-se como a maior reserva remanescente contínua de floresta tropical do planeta (Amaral *et al.*, 2007). Essa densa floresta, rica em recursos naturais, contém ampla diversidade de espécies, tanto de fauna quanto de flora (Soudani; François, 2014). Portanto, a conservação desse bioma é fundamental para a manutenção da biodiversidade global e para o equilíbrio ambiental, reforçando sua importância ecológica e socioeconômica.

Devido à abundância de recursos naturais, à rica biodiversidade e aos diversos papéis que desempenha no funcionamento do sistema terrestre, a Amazônia tem atraído a atenção da comunidade internacional ao longo das décadas. Além disso, esta floresta contribui economicamente para a região, com destaque para a exploração e o processamento industrial de madeira, que figuram entre as principais atividades econômicas (Veríssimo, 2006). Juntamente com a exploração madeireira, a exploração de inúmeros produtos florestais não madeireiros gera renda por meio de atividades extrativistas (Amaral *et al.*, 2007).

Apesar de sua importância ambiental, social e econômica, a floresta amazônica permanece em meio a um dilema entre a exploração de seus recursos e sua preservação. Nas últimas décadas, a floresta tem sido devastada devido às atividades antrópicas (Adeodato *et al.*, 2011). Atualmente, a Amazônia enfrenta inúmeras transformações, como incêndios florestais, desmatamento, assentamentos de reforma agrária, áreas de mineração e exploração madeireira (Barreto *et al.*, 2005).

Dessa forma, esse ecossistema vem sendo afetado, diretamente ou indiretamente, pela ação antrópica, resultando em alterações significativas no meio ambiente (Veríssimo, 2006). Diante disso, o manejo florestal de impacto reduzido torna-se essencial como uma atividade sustentável, representando uma das principais oportunidades de conciliar o uso e a conservação dos recursos florestais. As práticas de manejo florestal no Brasil são realizadas de acordo com a legislação florestal do país, utilizando métodos como: inventário das espécies, seleção de árvores comerciais, utilização de técnicas para derrubada, arraste, transporte e o planejamento de regeneração para o segundo ciclo de corte (Souza, 2015). Esses métodos garantem a retirada

de madeira e produtos não-madeireiros, enquanto preservam a biodiversidade e a produtividade da floresta.

Apesar do manejo florestal adotar técnicas voltadas para minimizar os impactos ambientais, a exploração seletiva de madeira pode gerar efeitos negativos para o ecossistema (Souza; Soares, 2013). No entanto, apesar dos possíveis efeitos negativos, quaisquer iniciativas que promovam a conservação das florestas tropicais são fundamentais para o equilíbrio climático no planeta, especialmente considerando que essas florestas armazenam uma concentração considerável de carbono na forma de biomassa (Mitchard, 2018).

Além do carbono armazenado como biomassa, o carbono presente das plantas nas florestas tropicais é incorporado ao solo na forma orgânica e passa por processo de decomposição. Assim, os ecossistemas terrestres são considerados importantes sumidouros de carbono, onde a maior parte do carbono em florestas encontra-se armazenado no solo (Machado, 2005). Esse elemento é fundamental para o solo, visto que influencia de forma significativa nas suas características físicas, influenciando condições como agregação, porosidade, infiltração e armazenamento de água (Vinciguerra; Domenico; Anderloni, 2018).

Dessa maneira, determinar os estoques de carbono no solo, assim como os atributos que os influenciam, é essencial para o desenvolvimento de práticas de manejo que favoreçam a retenção de carbono no solo e promovam a conservação ambiental de maneira eficiente (Marques *et al.*, 2013). Neste contexto, estimar as concentrações de carbono orgânico e seu estoque nos solos de florestas manejadas ao longo do ciclo de corte, que dura até 35 anos, pode permitir uma avaliação da adequação da atividade como uma alternativa sustentável.

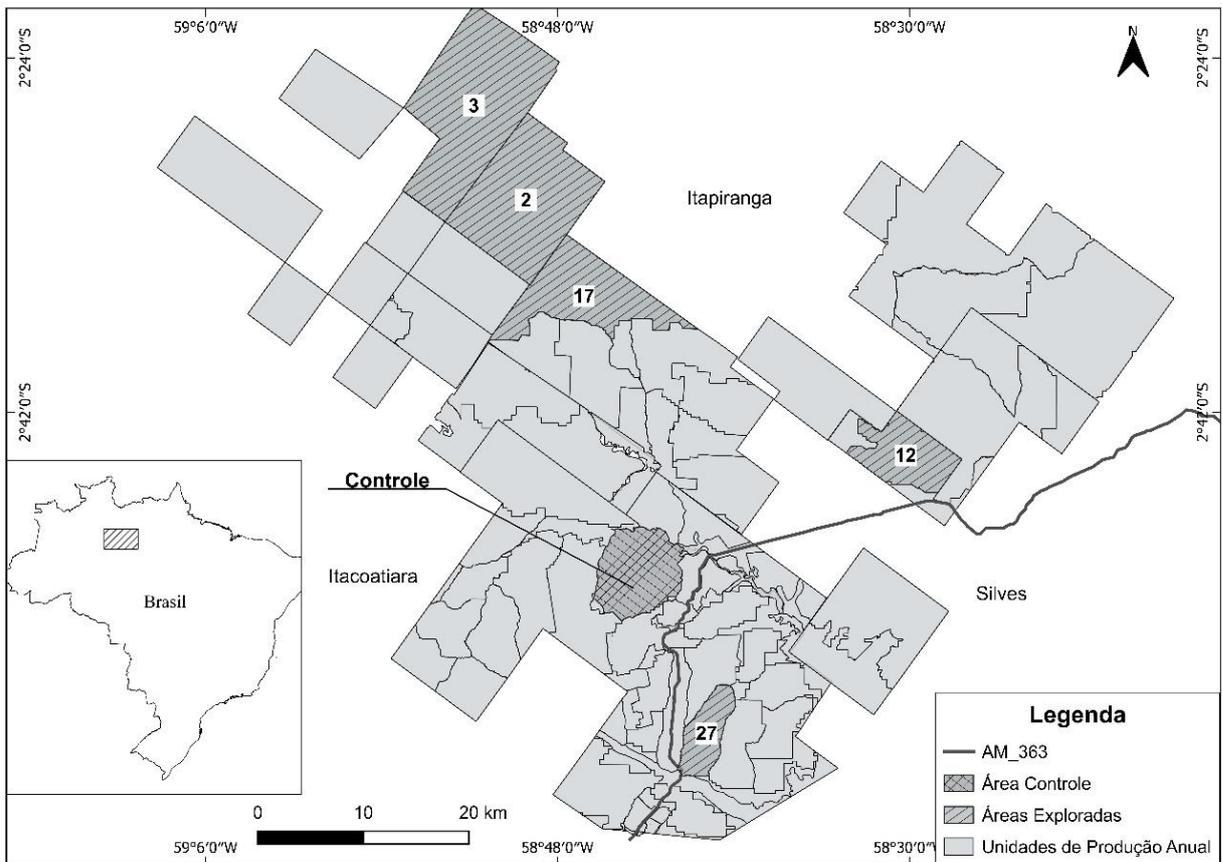
Nesse quesito, considerando que o manejo florestal pode promover a manutenção dos estoques de carbono no solo de florestas tropicais, a partir da minimização dos impactos da atividade de exploração madeireira, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos do manejo florestal sustentável a partir de estimativas dos efeitos do corte seletivo de madeira de impacto reduzido nos atributos e estoque de carbono no solo de florestas na Amazônia brasileira. Ainda, como objetivos deste trabalho: i) realizamos amostragens de solo em áreas de Floresta Amazônica com diferentes idades desde o corte seletivo de impacto reduzido; ii) caracterizamos os atributos do solo nas áreas de estudo; iii) determinamos a densidade do solo e a concentração de carbono orgânico e estimamos o estoque de carbono nas amostras de solo coletadas; e iv) testamos os efeitos do tempo após a exploração madeireira nas concentrações de carbono orgânico, nos atributos e estoque de carbono no solo nas áreas de estudo.

## 2.1 Material e Métodos

### 2.1.1 Área de estudo

As áreas de estudo estão inseridas em um conjunto de áreas destinadas à Exploração Madeireira de Impacto Reduzido (EIR), abrangendo mais de 281.200 hectares nos municípios de Itapiranga, Silves e Itacoatiara, no estado do Amazonas, Brasil (Figura 1).

Figura 1 - Localização das áreas exploradas e não explorada nas áreas de estudo na Amazônia Brasileira



Fonte: elaborado pelo autor

A atividade madeireira nas áreas é realizada pela empresa Mil Madeiras Preciosas Ltda., seguindo protocolos rígidos e com a certificação florestal FSC (Forest Stewardship Council). As técnicas de redução de impactos no contexto do manejo florestal sustentável incluem a seleção das árvores a serem exploradas (um subconjunto das espécies de interesse com diâmetro a altura do peito acima de 50 cm), o planejamento da construção dos pátios de estocagem, estradas e trilhas de arraste, além do direcionamento da queda das árvores de maneira a

minimizar os impactos (Werger, 2011), seguindo um ciclo de corte definido pela legislação de 35 anos e intensidade de corte de 15 a 20 m<sup>3</sup>/ha, estando dentro dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (PWA, 2021).

O clima na região do estudo é chuvoso (média de precipitação anual de 2.200 mm) e quente (média de temperatura anual de 26°C) na maior parte do ano, sendo classificado como do tipo Af de acordo com a classificação de Köppen (Alvares et al. 2013). A precipitação na estação seca varia entre 100 mm e 200 mm, enquanto na estação chuvosa varia entre 250 mm a mais de 400 mm (Zhuang *et al.*, 2017). A floresta ocorre em áreas de solo argiloso de baixa fertilidade, com elevada complexidade ambiental e diversidade biológica (IBGE, 2017). Árvores emergentes alcançam entre 30 a 50 m de altura, sendo que a maioria das árvores que formam o dossel atingem entre 20 e 30 m (IBGE, 2017).

### 2.1.2 Coleta de dados

Foram selecionadas seis áreas de estudo, incluindo uma não explorada, e cinco áreas com diferentes anos desde a exploração madeireira: 2, 3, 12, 17 e 27 anos. O desenho amostral foi composto por grupos de quatro pontos amostrais dispostos no formato de quadrado, com lado de 100 m, sendo um ponto amostral em cada ponta do quadrado. A distância mínima dos pontos amostrais mais próximos às vias de acesso (estradas não pavimentadas) das áreas de estudo foi de 50 m, a fim de minimizar o efeito de borda. Em cada área explorada, foram definidos sete grupos amostrais, com 500 m de distância mínima entre esses, totalizando 28 pontos amostrais por área. Para a área amostral com 2 anos, com o objetivo de testar os efeitos locais do corte seletivo de impacto reduzido, foram distribuídos pontos de amostragem com base na proximidade das árvores cortadas. Nesta amostragem, foram selecionados 15 pontos próximos às árvores cortadas e 15 pontos sem qualquer árvore cortada em um raio de 50 m, totalizando 30 pontos amostrais. Na área não explorada, foram demarcados dois grupos amostrais, com distância mínima de 500 m entre esses, totalizando oito pontos amostrais.

No total, foram avaliados 150 pontos e coletadas 300 amostras de solo. Em cada ponto, as amostras foram retiradas em duas profundidades: de 0 a 15 centímetros (camada A) e de 15 a 30 centímetros (camada B). Para isso, mini-trincheiras foram abertas com o uso de cavadeiras. As amostras foram extraídas nas duas profundidades definidas utilizando anéis volumétricos para a coleta de amostras indeformadas de solo, e amostras deformadas (cerca de 2 kg), foram acondicionadas em sacos plásticos resistentes.

### 2.1.3 Procedimentos laboratoriais

As análises de solo foram conduzidas no Laboratório de Solos do Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara, Universidade do Estado do Amazonas. As amostras com estruturas deformadas foram secas à sombra, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). A concentração de carbono orgânico do solo (COS em g.kg<sup>-1</sup>) foi determinada pelo método de oxidação úmida, enquanto a densidade aparente (DS em kg.dm<sup>-3</sup>) foi definida pelo método do anel volumétrico (Teixeira *et al.*, 2017). Os estoques de COS (em g.dm<sup>-3</sup>) foram calculados multiplicando-se COS e DS. Embora muitos estudos calculem estoques de COS por área para uma determinada camada em Mg.ha<sup>-1</sup>, geralmente para comparações em áreas maiores ou para estimativas regionais (Cerri *et al.* 2007, Marques *et al.* 2015, Barros & Fearnside 2019), optamos por um cálculo mais direto devido à abordagem local e comparativa entre áreas do presente estudo (as estimativas podem ser facilmente transformadas em Mg.ha<sup>-1</sup> para toda a camada multiplicando os estoques de COS por 1,5 ). Para a determinação da macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP ) e porosidade total (Pt), as amostras dos anéis foram saturadas, elevando-se gradualmente a lâmina d'água em uma bandeja plástica até cerca de dois terços da altura do anel. Após a saturação as amostras foram levadas à mesa de tensão para determinação da MiP e Pt do solo, utilizando o método da mesa de tensão (limite entre macroporos e microporos em -6 kPa), segundo metodologia da Embrapa (1997). Pela diferença entre a Pt e a MiP, obteve-se a MaP. A análise granulométrica foi obtida pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol. L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitação lenta no agitador tipo Wagner por 16 horas a 50 RPM, seguindo metodologia proposta por Teixeira *et al.* (2017). A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte foi calculado por diferença. Análises complementares de solo foram realizadas em colaboração com outros laboratórios, a partir de subamostras das amostras de solo coletadas, maceradas e peneiradas. Análises de pH em água, fósforo (P), sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), Magnésio (Mg), Alumínio (Al), Capacidade de Troca Catiônica Efetiva CTC (t), Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0 CTC (T), Índice de Saturação por Bases (V), H+Al, Índice de Saturação por Alumínio (m), Soma de Bases Trocáveis (SB), e Matéria Orgânica (M.O) foram realizadas no Laboratório de Análise de Solos e Plantas da EMBRAPA Amazônia Ocidental, em Manaus no Amazonas, utilizando métodos analíticos específicos. Análises de porcentagem total de nitrogênio (N) e carbono (C) foram realizadas pelo Laboratório de Análise de Carbono e Nitrogênio da Universidade Federal de Santa Maria,

no Rio Grande do Sul, com o uso de um espectrômetro de massa de razões isotópicas acoplado a um analisador elementar.

#### 2.1.4 Análise dos dados

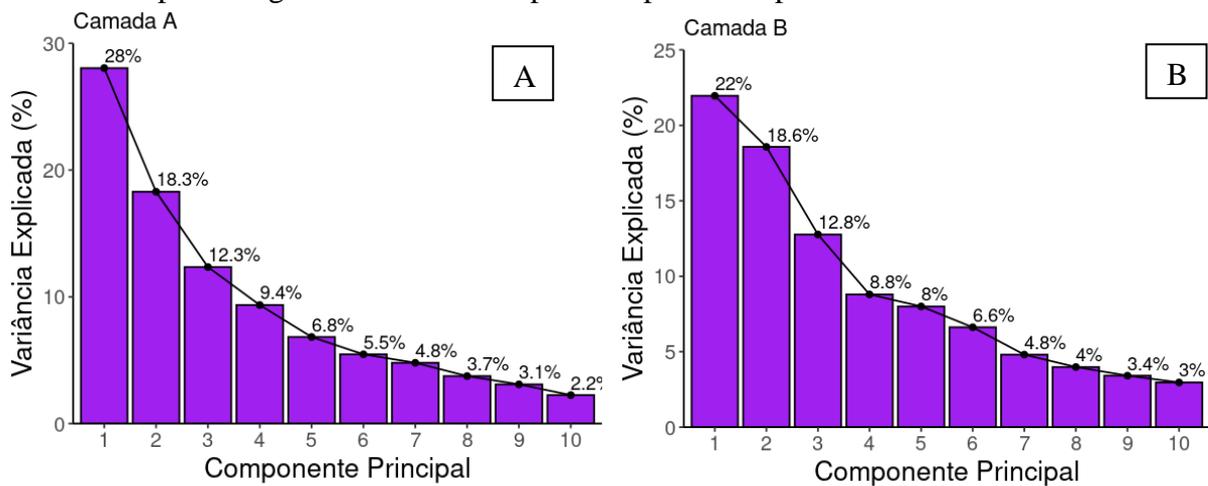
Para acessar os efeitos do EIR com o tempo após a atividade, as características do solo nos pontos amostrais foram comparadas entre as áreas com diferentes anos desde a exploração madeireira. Os conjuntos de dados foram separados entre as duas camadas de profundidade. A dimensionalidade inicial (23 atributos) foi reduzida com o uso da Análise de Componentes Principais (PCA). Para isso, os atributos foram padronizados previamente a partir da diferença dos valores individuais da média e divisão pelo desvio padrão. O número de componentes principais selecionados foi definido com base no critério de *broken-stick*. Gráficos do tipo biplot foram construídos para interpretação da ordenação, com o agrupamento dos pontos dentro das mesmas áreas de estudo.

Para testar se as características do solo foram dependentes da idade das áreas de estudo, foi utilizado o teste de correlação de Spearman entre a idade das áreas (ranqueadas) e os componentes principais, para cada camada de profundidade. Nesta análise, a área não explorada recebeu o ranque inicial, sendo seguida pela área explorada a 27 anos, e assim sucessivamente até a área mais recentemente explorada, com o propósito de verificar a existência de um possível gradiente de qualidade ambiental. Para a mesma finalidade, também foi realizada Análise de Variância (ANOVA), com os modelos construídos utilizando a identidade das áreas como variável explanatória e cada componente como variável resposta. O teste de Tukey foi utilizado para comparações post-hoc. Finalmente, o estoque de carbono orgânico no solo foi comparado entre as áreas de estudo através de ANOVA com teste de Tukey para comparações post-hoc, no caso de resultados significativos.

## 2.2 Resultados

Pelo critério de *broken-stick*, quatro componentes principais foram selecionados para a camada A e seis componentes para a camada B. As porcentagens da variância explicadas pelos componentes da camada A somaram 68% (28%, 18,3%, 12,3% e 9,4%), enquanto da camada B somaram 76,8% (22%, 18,6%, 12,8%, 8,8%, 8% e 6,6%) (Figura 2A e 2B).

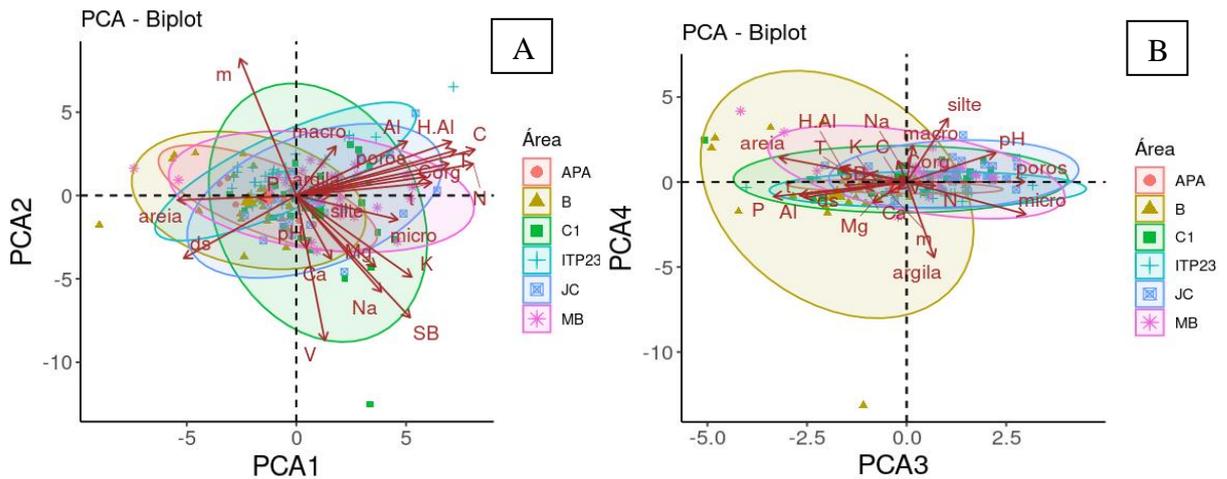
Figura 2 - (A) Porcentagens da variância explicadas pelos componentes da camada A e (B) porcentagens da variância explicadas pelos componentes da camada B



Fonte: elaborado pelo autor

O componente 1 da camada A foi mais correlacionado com os atributos do solo fração areia, porosidade total, microporosidade, DS, COS, N e C. O segundo componente representou variações em DS, C e V. Já o terceiro componente a fração areia, a porosidade total e a microporosidade. O quarto componente foi mais correlacionado com a fração areia, a macroporosidade, a microporosidade, DS, pH, H.AI, T e V (Figuras 3A e 3B).

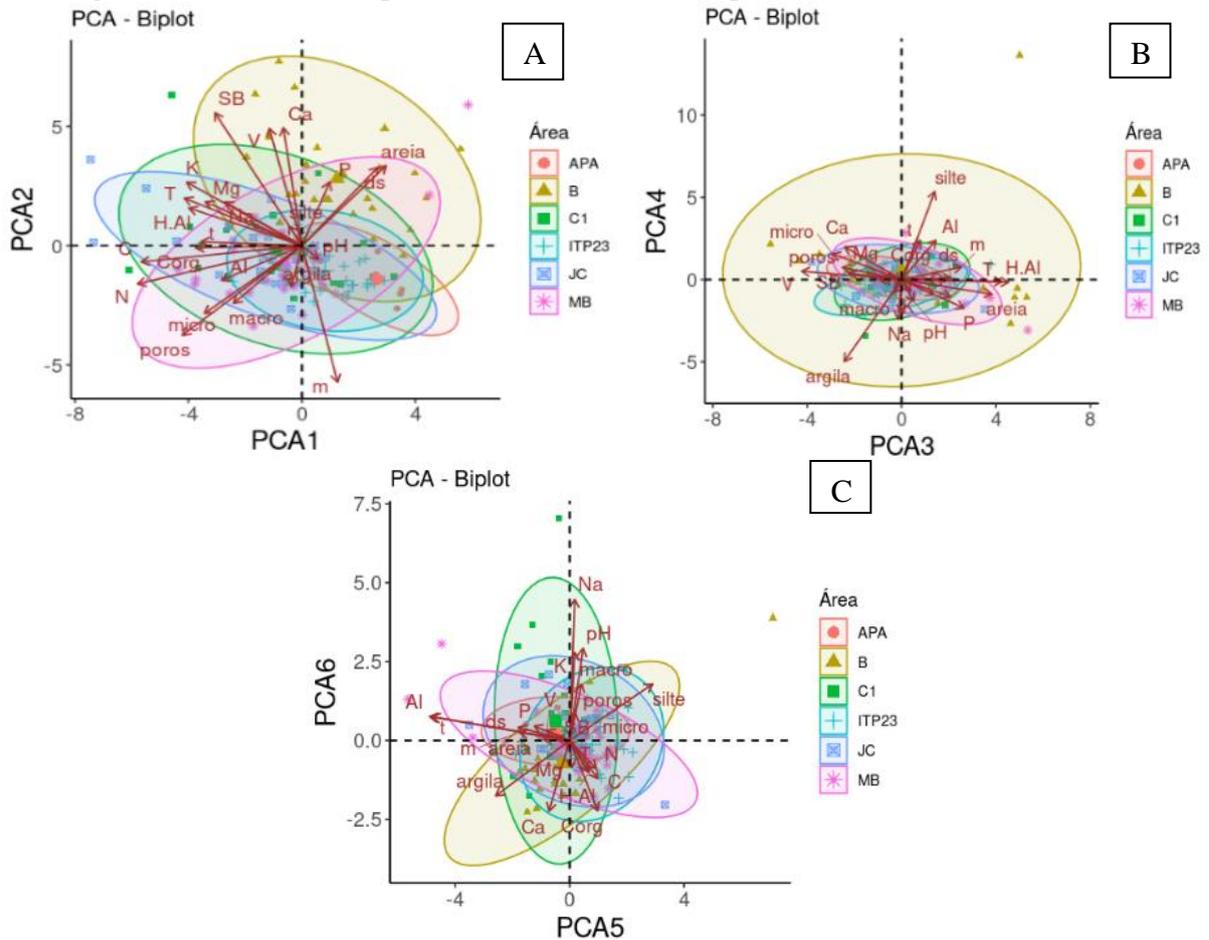
Figura 3 - Gráficos de biplot da camada A (A) componentes 1 e 2 e (B) 3 e 4



Fonte: elaborado pelo autor

Em relação à camada B, o componente 1 foi explicado por variações na porosidade total, microporosidade, COS, N, C, K, H.AI, t e T. Já o componente 2 foi correlacionado com Ca, SB, V e M (Figura 4A). O componente 3 representou variações na fração areia, H.AI, T e V. O componente 4 representou variações nas frações de argila e silte (Figura 4B). O componente 5 em Al e t. Finalmente, o componente 6 indicou variações em K (Figuras 4C). Os gráficos de biplot indicam uma elevada sobreposição nos atributos do solo em amostras coletadas nas diferentes áreas de estudo.

Figura 4 - Gráficos de biplot da camada B: (A) componentes 1 e 2 (B) 3 e 4 (C) 5 e 6



Fonte: elaborado pelo autor

O teste de correlação de Spearman indicou resultado significativo, porém com correlação positiva de fraca a moderada, para os componentes 1 ( $\rho = 0,38$ ,  $p < 0,01$ ), 3 ( $\rho = 0,51$ ,  $p < 0,001$ ) e 4 ( $\rho = 0,41$ ,  $p < 0,001$ ) na camada A. Já na camada B, resultados significativos e com correlações de fraca a moderadas também foram obtidos para os componentes 1 ( $\rho = -0,38$ ,  $p < 0,001$ ), 2 ( $\rho = -0,31$ ,  $p < 0,001$ ), 5 ( $\rho = -0,31$ ,  $p < 0,001$ ) e 6 ( $\rho = 0,18$ ,  $p = 0,03$ ).

Testes de ANOVA indicaram diferenças significativas entre as áreas no componente 1 da camada A ( $F_{5,144} = 9,5$ ,  $p < 0,001$ ), de maneira que as áreas com 2, 3 e 17 anos apresentaram valores maiores que as áreas com 12 e 27 anos e a área não explorada. O componente 2 da camada A apresentou atributos diferentes ( $F_{5,144} = 5,1$ ,  $p < 0,001$ ) apenas entre a área com 12 anos após a exploração e as áreas com 3, 17 e 27 anos. O componente 3 da camada A apresentou diferenças significativas ( $F_{5,144} = 13,6$ ,  $p < 0,001$ ), principalmente da área com 27 anos desde a exploração com as demais. O último componente interpretado da camada A demonstrou

diferenças ( $F_{5,144} = 5,1$ ,  $p < 0,001$ ) entre a área com 2 anos de exploração e as áreas com 12 e 27 anos, e entre a área com 3 anos de exploração e a área com 27 anos.

Em relação à camada B, o componente 1 apresentou diferenças ( $F_{5,144} = 10,2$ ,  $p < 0,001$ ) entre as áreas com 2, 3 e 17 anos e as áreas não explorada e com 27 e 12 anos após a exploração. Já o componente 2 apresentou diferenças ( $F_{5,144} = 23,5$ ,  $p < 0,001$ ) entre a área com 27 anos após a exploração e as demais áreas de estudo. Os componentes 3 e 4 não apresentaram diferenças entre as áreas de estudo. O componente 5 mostrou diferenças ( $F_{5,144} = 3,2$ ,  $p < 0,008$ ) entre a área com 12 anos após a exploração e as áreas com 27 e 17 anos. O componente 6 apresentou diferenças ( $F_{5,144} = 4,3$ ,  $p = 0,001$ ) entre a área com 27 anos após a exploração e as áreas com 17 e 3 anos.

O estoque de carbono orgânico no solo nas áreas de estudo foi em média  $20,6 \pm 27,4$  g.dm<sup>-3</sup> na camada A, e  $14,4 \pm 19,2$  g.dm<sup>-3</sup> na camada B. Houve diferenças significativas entre as áreas de estudo no estoque de carbono na camada A ( $F_{5,144} = 2,8$ ,  $p = 0,02$ ) e na camada B ( $F_{5,144} = 5,2$ ,  $p < 0,001$ ). Na camada A, o teste de Tukey mostrou que as áreas com dois anos e 27 anos após a exploração diferiram entre si, porém todas as outras comparações par a par não foram significativas. Já na camada B, a área não explorada diferiu das áreas com 17 e dois anos após a exploração, e a área com 12 anos apresentou diferenças significativas em relação às áreas com 17 e 27 anos após a exploração.

### 2.3 Discussão

Os resultados indicam que a exploração madeireira de impacto reduzido (EIR) não levou a alterações significativas no estoque de carbono do solo ao longo do tempo. Apesar de variações nos atributos do solo entre as áreas, notamos que os padrões observados não seguiram um gradiente claro de impacto temporal, sugerindo que as técnicas de exploração madeireira praticada na região foi capaz de minimizar alterações nos estoques de carbono e nas características físico-químicas do solo. Esses resultados são coerentes com estudos anteriores que apontam a EIR como uma estratégia eficiente para equilibrar a exploração econômica e a conservação ambiental (Putz *et al.*, 2008).

Observamos que estoque de carbono orgânico do solo não apresentou uma tendência sistemática de redução ou recuperação ao longo do tempo. Ainda que exista diferenças significativas entre algumas áreas, os valores não seguiram um padrão linear, indicando que fatores além do manejo podem influenciar a dinâmica do carbono no solo. Estudos indicam que variações no estoque de carbono podem ser influenciadas por características intrínsecas do solo, como textura e fertilidade natural (Koutika *et al.*, 1996), além de fatores climáticos como precipitação e temperatura (Nottingham *et al.*, 2020).

A Análise de Componentes Principais (PCA) apontou que frações granulométricas, porosidade total e densidade do solo foram os principais determinantes das diferenças entre as áreas. Apesar disso, a elevada sobreposição entre os dados das diferentes áreas sugere que o impacto da EIR nos atributos do solo foi mínimo. Isso é consistente com resultados obtidos por Assis *et al.* (2020), que observaram que o impacto do manejo florestal sobre a estrutura do solo tende a ser reduzido quando técnicas de baixo impacto são adotadas.

A correlação de Spearman demonstrou relações fracas a moderadas entre o tempo de exploração e os componentes principais do solo, sugerindo que, apesar de alguma variação nos atributos do solo ao longo do tempo, não há um padrão evidente de degradação ou recuperação progressiva. Esses resultados contrastam com os de estudos realizados em áreas de exploração madeireira, nos quais observou-se uma redução significativa do carbono do solo e alterações estruturais que comprometem a fertilidade e a estabilidade física do solo (Chiti *et al.* 2016).

A análise de variância (ANOVA) indicou diferenças significativas nos componentes principais do solo e nos estoques de carbono entre algumas áreas. Entretanto, a maior parte das diferenças ocorreu entre grupos específicos, sem um padrão claro de impacto progressivo. Isso sugere que os processos de ciclagem de carbono no solo podem ser mais influenciados por

fatores locais, como composição da vegetação e condições microclimáticas, do que pelo tempo decorrido desde a exploração (Solomon *et al.*, 2007).

O estoque de carbono orgânico no solo variou entre as áreas estudadas, mas sem evidências de uma redução sistemática decorrente do manejo florestal. Dessa forma, os dados obtidos indicam que o manejo florestal pode ser uma alternativa viável para a conservação dos estoques de carbono na Amazônia. Em comparação com técnicas convencionais de exploração, que frequentemente levam à degradação do solo e à perda de carbono (Zhou *et al.*, 2018), o manejo florestal sustentável oferece uma abordagem mais equilibrada entre conservação e uso econômico dos recursos florestais.

## REFERÊNCIAS

- ADEODATO, S.; MONZONI, M.; BETIOL, L. S.; VILLELA, M. **Madeira de ponta a ponta: o caminho desde a floresta até o consumo**. São Paulo: Fundação Getulio Vargas, 2011.
- AMARAL, P. AMARAL NETO, M.; NAVA, F. R.; FERNANDEZ, K. **Manejo florestal comunitário na Amazônia brasileira: avanços e perspectivas para a conservação florestal**. Brasília: Serviço Florestal brasileiro, 2007.
- ASSIS, T. O.; AGUIAR, A. P. D. de; VON RANDOW, C.; GOMES, D. M. de P.; KURY, J. N.; OMETTO, J. P. H.; NOBRE, C. A. CO<sub>2</sub> emissions from forest degradation in brazilian Amazon. *Environmental Research Letters*, v. 15, n. 10, 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9cfc>
- BARRETO, P.; SOUZA JUNIOR, C.; ANDERSON, A.; SALOMÃO, R.; WILES, J. Pressão humana no bioma amazônia. **Imazon**, n. 3, 2005.
- CHITI, T.; PERUGINI, L.; VESPERTINO, D.; VALENTINI, R. Effect of selective logging on soil organic carbon dynamics in tropical forests in central and western Africa. *Plant and Soil*, v. 399, p. 283-294, 2016. DOI: 10.1007/s11104-015-2697-9
- EGUIGUREN, P.; FISCHER, R.; GÜNTER S. Degradation of ecosystem services and deforestation in landscapes with and without incentive-based forest conservation in the ecuadorian Amazon. **Forests**, v.10, n. 45, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10050442>
- IBGE - FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, n. 3, p. 259-263, 2006. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- KOUTIKA, L.; BARTOLI, F.; ANDREUX, F.; CERRI, C. C.; BURTIN, G.; CHONÉ, T.; PHILIPPY, R. Organic matter dynamics and aggregation in soils under rain forest and pastures of increasing age in the eastern Amazon Basin. **Geoderma**, v. 76, p. 87-112, 1996. DOI: 10.1016/S0016-7061(96)00105-X.
- MACHADO, P. L. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005.
- MARQUES, J. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W.G.; ARAÚJO, E. M. Carbono orgânico em solos sob floresta na Amazônia Central. In: Pesquisa e inovação para o desenvolvimento do Brasil: anais. CONGRESSO NORTE NORDESTE DE PESQUISA E INOVAÇÃO, 8, 2013, Salvador. **Anais [...]**. Salvador: Embrapa Solos, 2013.
- MALHI, Y.; ADU-BREDU, S.; ASARE, R. A.; LEWIS, S. L.; MAYAUX, P. African rainforests: past, present and future. **Philosophical Transactions of the Royal**, v. 368, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0312>

MITCHARD, E. T. A. The tropical forest carbon cycle and climate change. **Nature**, v. 559, n. 7715, p. 527-534, 2018.

NOTTINGHAM, A. T.; MEIR, P.; VELASQUEZ, E.; TURNER, B. L. Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest. **Nature**, v. 584, n. 7820, p. 234-237, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2566-4>

PUTZ, F. E.; SIST, P.; FREDERICKSEN, T.; DYKSTRA, D. Reduced-impact logging: challenges and opportunities. *Forest Ecology and Management*, v. 256, n. 7, p. 1427-1433, 2008. DOI: 10.1016/j.foreco.2008.03.036

SOUZA, M. A. S. **Dinâmica e produção de uma floresta sob regime de manejo sustentável na Amazônia central**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas: estrutura, dinâmica e manejo**. Viçosa: Editora UFV, 2013.

SOUDANI, K.; FRANÇOIS, C. Remote sensing: a green illusion. **Nature**, v. 506, n. 7487, p. 165-166, 2014.

SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; KINYANGI, J.; AMELUNG, W.; LOBE, I.; PELL, A.; RIHA, S.; NGOZE, S.; VERCHOT, L.; MBUGUA, D.; SKJEMSTAD, J.; SCHÄFER, T. Longterm impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. *Global Change Biology*, v. 13, n. 2, p. 511-530, 2007. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2006.01304.x

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 3ª ed. Revista e ampliada. – Brasília: Embrapa, 2017, 573 p.

VERÍSSIMO, A. **Estratégia e mecanismos financeiros para florestas nativas do Brasil**. Documento Técnico, FAO, 2006.

VINCIGUERRA, T.; DOMENICO, C. N. B. D.; ANDERLONI, N. Utilização de equações diferenciais ordinárias na simulação do teor de carbono orgânico em argissolo sob diferentes tipos de manejo. **Conexões-Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 2, p. 28-37, 2020.

WERGER, M. J. A. **Sustainable management of tropical rainforests**. Paramaribo: Tropenbos International, 2011.

ZHOU, Z.; WANG, C.; LUO, Y. Effects of forest degradation on microbial communities and soil carbon cycling: a global metaanalysis. *Global Ecology and Biogeography*, v. 27, n. 1, p. 110-124, 2018. DOI: 10.1111/geb.12663

ZHUANG, Y.; FU, R.; MARENGO, J. A.; WANG, H. Seasonal variation of shallow to deep convection transition and its link to the environmental conditions over the central Amazon. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 5, p. 2649-2666, 2017.