

Determinação dos Estoques de Carbono e Nitrogênio nas Frações Físicas da Matéria Orgânica em Solos Antrópicos (Terra Preta de Índio) e Não Antrópicos da Amazônia Central

Determination of Carbon and Nitrogen Stocks in Physical Fractions of Organic Matter in Anthropogenic (Terra Preta de Índio) and Non-Anthropogenic Soils in Central Amazonia

Ricardo Soares,^{a,b,*} John E. L. Maddock,^b David V. B. Campos,^c Beata E. Madari,^d Pedro Luiz de O. A. Machado^d

^aInstituto Estadual do Ambiente, Av. Venezuela 110; Saúde, CEP 20081-312, Rio de Janeiro–RJ, Brasil.

^b Universidade Federal Fluminense, Campus do Valonguinho, Departamento de Geoquímica, Outeiro de São João Batista s/n°, Centro, CEP 24020-150, Niterói–RJ, Brasil.

^cEmbrapa Solos, Rua Jardim Botânico 1024, Jardim Botânico, CEP 22460-000, Rio de Janeiro–RJ, Brasil.

^dEmbrapa Arroz e Feijão, Rodovia GO-462, km 12, Fazenda Capivara, Zona Rural, Caixa Postal 179, CEP 75375-000, Santo Antônio de Goiás–GO, Brasil.

*E-mail: ricardos@inea.rj.gov.br

Recebido em: 30 de Março de 2021

Aceito em: 13 de Julho de 2021

Publicado online: 9 de Novembro de 2021

The soil organic matter, as the Amazonian Dark Earths, have functional compartments with different characteristics concerning composition and dynamics and these fractions can be evaluated using physical fractionation, in which the fractions are separated by densimetric and granulometric methods. In the Amazon region, studies involving physical fractionation are scarce. This work aimed to identify the compartments and their carbon and nitrogen stocks, the effect of fallow time, and to evaluate the use of these fractions as indicators of soil quality, in soils collected in areas of Amazonian Dark Earths and non-anthropogenic soils. Physical fractionation of organic matter was carried out in soil samples from Amazonian Dark Earths and non-anthropogenic soils, with forest cover. The carbon and nitrogen contents in each fraction were determined, and their stocks. The fallow time influenced the dynamics of organic matter in the Amazonian Dark Earths. The light-free fraction proved to be a sensitive diagnostic attribute in the superficial layers. Fallow or the conversion of intensely cultivated Amazon areas to secondary forests can be a sustainable practice for mitigating carbon and nitrogen losses in the soil, especially in the most labile and reactive fractions present in the most superficial layers of the soil.

Keywords: Amazonian Dark Earths; carbon and nitrogen stocks; physical fractionation of the soil organic matter; global climate change.

1. Introdução

A Bacia Amazônica brasileira já teve mais de 50 milhões de hectares desmatados para que fossem convertidos em áreas com atividades agrícolas ou pecuárias em prol do desenvolvimento nacional, desde o início do período histórico, informalmente, conhecido como a “Grande Aceleração” (após a década de 1950).¹⁻³ A intensificação na mudança do uso e ocupação da terra leva a significativas transformações na vegetação que acarretam em importantes modificações nas características físicas e químicas dos solos e, conseqüentemente, induzem à interconversões de matéria e energia nos diversos compartimentos capazes de estocar o carbono e o nitrogênio presentes na Matéria Orgânica do Solo (MOS).² A conversão de florestas para atividades agropecuárias na Amazônia, por exemplo, foi responsável pela emissão de 11,2 Gigatoneladas (Gt) de carbono na atmosfera, sendo que a maioria dessas emissões (66 à 78%) são causadas pela conversão de florestas nativas à pastagens.³ Logo, o desmatamento das florestas tropicais úmidas apresenta-se como um tema de preocupação internacional, principalmente pela necessidade da preservação de sua alta biodiversidade, manutenção de altos estoques de carbono e nitrogênio na biomassa e no solo,⁴ assim como pelo seu papel fundamental para a regulação do clima do Sistema Terra.^{1,5}

Os solos amazônicos são, predominantemente, da classe dos Argissolos e Latossolos,⁶⁻⁸ que por sua vez costumam ser altamente intemperizados, apresentam baixa fertilidade devido aos baixos teores de nutrientes (minerais e MOS) e reduzida Capacidade de Troca Catiônica (CTC) por conta do predomínio de minerais de argila de baixa atividade; bem como elevada acidez, alta saturação por alumínio e alta concentração de óxidos/hidróxidos/óxi-hidróxidos de ferro e alumínio.⁸⁻¹⁰ Conseqüentemente, devido às suas características pedológicas intrínsecas, uma fração expressiva dos solos agrícolas amazônicos possui um baixo potencial produtivo, o que se converte em um fator limitante para sustentabilidade ambiental e econômica da região,

assim como para o aumento da insegurança alimentar dos povos locais.^{11,12} Contudo, nessa mesma região existem solos antrópicos denominados Terra Preta de Índio (TPI) que são altamente férteis, possuem horizontes superficiais com coloração escura, altas concentrações de P, Ca, Mg, Mn, Zn e MOS com elevada estabilidade.^{5,6,8-19}

As TPIs se constituem em uma anomalia pedológica que despertam grande curiosidade e interesse na comunidade científica internacional desde a sua primeira descrição científica há mais de 120 anos.^{11,12,16,17,19-21} Além disso, em 2011 as TPIs foram propostas como marcadores estratigráficos antrópicos (*Golden Spikes*) da atual Época geológica Antropoceno,²²⁻²⁵ mas com grande reação contrária da comunidade internacional de geociências que alega que tais solos antrópicos não possuem as características de conservação estratigráficas necessárias para serem consideradas como um legítimo *Golden Spike*.^{9,10} Ao longo do tempo, diferentes hipóteses foram propostas como possíveis processos pedogênicos responsáveis pela origem das TPIs,^{11,26} sendo a mais aceita que esses solos foram formados pela interação das respectivas populações pré-Colombianas,²⁷ mas sem a formulação de um consenso se foi de maneira intencional ou não.^{5,6,11,18} Contudo, Silva *et al.*,¹⁹ apresentaram em janeiro de 2021 uma nova hipótese na prestigiosa revista *Nature* no qual alegam que a alta fertilidade das TPIs é simplesmente resultado de deposições fluviais dos sedimentos dos rios amazônicos e que os povos pré-Colombianos apenas se aproveitaram dessas localidades sem contribuição efetiva para o seu melhoramento. Tal hipótese não foi bem aceita por 44 proeminentes membros da comunidade científica internacional que se dedicam a estudar a pedogênese das TPIs e decidiram submeter em fevereiro de 2021 um desagravo junto à mesma revista *Nature*.²⁸

Independentemente de qualquer tipo de polêmica, a hipótese pedogênica ainda mais aceita é que as TPIs obedeceram a pelo menos três etapas:^{26,27}

- Formação do carvão (*Black Carbon*), que seria o carbono de origem pirogênica, com composição e estrutura molecular altamente complexa (grupos funcionais aromáticos), pouco reativo (recalcitrante) que contribui com o acréscimo da fertilidade do solo;
- Incorporação de nutrientes, que seriam adicionados aos solos oriundos de fontes diversas, como cinzas de fogueiras, resíduos de combustão incompleta e carvão, biomassa de resíduos vegetais terrestres e aquáticos, adição de excrementos humanos e restos de animais (ossos de mamíferos, carapaça de quelônios, restos de ictiofauna etc.);
- Ação microbiana, que fariam a ciclagem contínua dos nutrientes, tanto pela decomposição da MOS, quanto pela imobilização dos nutrientes no solo, impedindo as perdas por erosão e lixiviação.

As TPIs costumam ter o triplo de conteúdo de MOS e, em média, são seis vezes mais estáveis do que aquelas

MOS tipicamente observadas para áreas com Solos Não Antrópicos (SNA) adjacentes, que não possuem Horizonte A antrópico.^{8,27} Por outro lado, a fertilidade mais elevada das TPIs indica que as suas MOS apresentam compartimentos funcionais químicos reativos e/ou componentes lábeis, o que pode indicar a ocorrência de processos distintos nessas MOS, que competem ou regulam de forma alternada a efetividade da recalcitrância e da reatividade, ou em outras palavras, a capacidade da MOS em TPIs de interagirem com outros componentes matriciais do solo e de ser protegida contra a decomposição química ou biológica.¹¹ Consequentemente, os estudos da MOS em TPIs não podem se restringir simplesmente à quantificação total do C ou do N, como se fossem pertencentes à um componente simples e homogêneo,^{4,11,12,15,29} quando na verdade apresentam alta complexidade estrutural com possíveis interações com a matriz mineral do solo, praticamente se comportando como um conjunto heterogêneo de materiais orgânicos diferindo em composição e grau de disponibilidade para a microbiota em função do ambiente.³⁰ O estudo da MOS em seus vários compartimentos, assim como a relação com o manejo do solo pode proporcionar embasamento teórico robusto para a adoção de estratégias efetivas para o uso sustentável dos solos da Amazônia.^{29,31}

Deve-se considerar que, tanto para as TPIs, quanto para os SNAs da Região Amazônica a MOS possui diversos compartimentos que apresentam características heterogêneas: um componente vivo composto principalmente pela microfauna e microorganismos do solo, bem como um componente morto.⁴ Este componente morto pode ser ainda subdividido em Frações Leves (FL) que são compostas pela Fração Leve Livre (FLL), que seria a matéria macroorgânica e a Fração Leve Intra-Agregado (FLIA), assim como as Frações Pesadas (FP) que são compostas por partículas com diferentes granulometrias da matriz mineral dos solos: Areia (F_{Areia}), Silte (F_{Silte}) e Argila (F_{Argila}). A FLL é relativamente mais lábil,³¹ mineralizável e sensível às mudanças ocasionadas pelo manejo ou pelo desmatamento,^{4,8,30,33-36} por ser composta por resíduos vegetais e outros componentes lábeis que se esgotam rapidamente após a remoção das camadas superficiais, enquanto a FLIA e a FP costumam conter a MOS mais estável³² e mais bem protegidas pelos agregados e demais partículas do solo.^{11,15,31,36}

Apesar da enorme importância em se buscar aprimorar o entendimento da dinâmica da MOS, expressa pelos estoques de C e de N nas diferentes frações físicas dos solos amazônicos, quer sejam TPIs ou SNAs, ainda são escassos os estudos que executem o fracionamento físico que abranja as cinco frações da MOS nessa região.^{4,30} Recentemente, foram determinados os estoques de C nas frações físicas em três diferentes tipos de SNAs (Argissolo, Latossolo e Espodossolo) em uma catena sob floresta primária localizada em Manaus (AM),^{4,30} assim como foram determinados os estoques de C e N nas FLs de TPIs e SNAs (Latossolo) em áreas impactadas pelo cultivo de Citrus em

Manacapuru (AM)⁸ e foi executado apenas o fracionamento densimétrico (FLs) para a determinação de C e N em TPIs e SNAs (Argissolo) sob floresta primária em Iranduba (AM). Por outro lado, tem-se registro da determinação das concentrações de C e de *Black Carbon* em FLL, FLIA e FP (sem distinção entre as F_{Areia} , F_{Silte} e F_{Argila}) em TPIs e SNAs (Latossolos) sob diferentes cultivos agrícolas (mamão, manga, maracujá, mandioca etc.) em áreas próximas à Manaus (AM) e Santárem (PA);¹⁷ sendo o mesmo observado em um experimento visando o entendimento sobre a taxa de mineralização de *Black Carbon* em TPIs e SNAs (Latossolos) localizados em sítios arqueológicos em Manaus (AM).^{32,37} Logo, até o presente momento não foram identificados estudos que avaliem, concomitantemente, os estoques de C e N nos diferentes constituintes das frações em TPIs e em SNAs sob florestas secundárias, constituindo-se em uma importante lacuna do conhecimento a respeito da distribuição de C e N nas frações do solo e sobre quais seriam os atributos distintivos dos solos amazônicos que influenciariam diretamente na dinâmica de C e N, com isso possibilitando diminuir as incertezas em torno das potenciais emissões fugitivas dos Gases de Efeito Estufa (GEE) CO₂, CH₄ e N₂O para a atmosfera, caso as florestas sejam convertidas em áreas de atividades agropecuárias.

Mediante tudo o que foi exposto acima, esse estudo tem como objetivos: (i) determinar os estoques de carbono e nitrogênio e suas distribuições entre os diferentes constituintes das Terras Pretas de Índio e Solos Não Antrópicos (Argissolos) sob florestas secundárias no estado do Amazonas (AM); (ii) avaliar o efeito do tempo de pousio entre as duas áreas de Terras Pretas de Índio; (iii) avaliar a sensibilidade de cada compartimento do solo como um potencial indicador das alterações na qualidade da matéria orgânica em solos sob florestas secundárias.

2. Material e Métodos

2.1. Descrição das áreas de estudo

As TPIs e os SNAs avaliados neste estudo estão distribuídos entre os municípios de Rio Preto da Eva, Humaitá, Novo Aripuanã e Apuí, todos pertencentes ao estado do Amazonas (Tabela 1), e foram completamente descritos pedologicamente com ênfase nas características físicas e química por Soares *et al.*,^{9,10} As áreas de TPI (P01

e P02) estão situadas em solos sob florestas secundárias (capoeiras), cujas idades contabilizam 10 e 20 anos de pousio, respectivamente. Também, as demais áreas SNAs (P03, P04 e P05) estão situadas em Argissolos sob florestas secundárias, sem que haja registro cronológico dos tempos de pousios das mesmas.^{9,10}

Conforme apontado por Soares *et al.*,^{9,10} estas áreas estão inseridas no domínio climático tropical quente e úmido, Am (chuvas do tipo monção) segundo classificação de Köppen, caracterizado por apresentar um período seco de curta duração, com precipitações pluviiais entre 2.250 e 2.750 mm, temperaturas médias anuais variando entre 25 e 27 °C e umidade relativa do ar entre 85 e 90%. A vegetação característica dessa região é a Floresta Tropical Densa, constituída por árvores adensadas e multiestratificadas com 20 a 50 m de altura, com clima úmido, elevadas temperaturas e alta precipitação.

2.2. Coleta e tratamento das amostras

Foram abertas quatro trincheiras nestas áreas (P01 à P05). Sendo que nas duas áreas de TPIs (P01 e P02) foram coletadas amostras em sete camadas estratigráficas costumeiramente usadas em estudos de fracionamento físico da MOS (0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm). Em relação aos demais SNAs preferiu-se utilizar os horizontes pedológicos naturais para que possam servir como áreas-controle para futuros estudos que avaliem a dinâmica da MOS em solos amazônicos sob floresta secundária.

Posteriormente, as amostras de solo foram secas em estufa com circulação de ar forçada, à temperatura de 40°C, destorroadas, tamisadas em peneira de 2,0 mm; recolhendo-se as frações dos solos não retidas na peneira, constituindo-se assim terra fina seca ao ar (TFSA).³⁸

2.3. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo

Todas as amostras de TFSA foram fracionadas fisicamente no laboratório de análise de água, solo e planta (LASP) da Embrapa Solos, segundo a metodologia proposta pela Embrapa³⁸ e adaptada de Sohi *et al.*³⁹

2.3.1. Fracionamento densimétrico

A obtenção das FLs da matéria orgânica foi realizada a partir da metodologia elaborada por Sohi *et al.*,³⁹ e adaptada

Tabela 1. Localização georreferenciada dos perfis de solo sob florestas secundárias avaliados neste estudo

| Perfil | Município | Coordenadas | |
|--------|------------------|---------------|----------------|
| P01 | Rio Preto da Eva | S 2°40'51,80" | O 59°43'15,70" |
| P02 | Rio Preto da Eva | S 2°40'52,37" | O 59°43'16,48" |
| P03 | Humaitá | S 7°52'50,60" | O 63°14'57,40" |
| P04 | Novo Aripuanã | S 5°13'27,10" | O 60°14'02,00" |
| P05 | Apuí | S 6°52'38,80" | O 59°13'31,80" |

por Campos e Machado.³⁸ As FLs foram extraídas de 5,00 g de TFSA, em sextuplicata, por meio da adição de 35,00 mL de solução de NaI ($\rho = 1,80 \text{ g cm}^{-3}$) da marca Merck, seguida de leve agitação manual por 30 segundos e centrifugação a 18.000 rpm por 15 minutos, sob temperatura de 18 °C em uma centrífuga refrigerada da marca International Equipment Company e modelo B-22M. O sobrenadante foi succionado e filtrado com o auxílio de uma bomba à vácuo e logo em seguida as frações foram separadas em filtro de fibra de vidro (marca Whatman, tipo GF/A, 47 mm diameter – 2 μm de retenção). A fração coletada foi lavada abundantemente com água ultrapura para a eliminação do excesso de NaI, contaminantes salinos e partículas minerais do solo presente na FLL. Após a remoção da FLL, a FLIA foi obtida após aplicação de ultra-som por 3 minutos por intermédio de ultrassom de ponta, modelo Misonix XL 2020 da marca Farmingdale com uma sonda ultra-sônica de 19 mm de diâmetro, que forneceu energia equivalente a uma intensidade de 400 J mL⁻¹, visando à desagregação e dispersão do solo. Após este tratamento, repetiu-se o procedimento para coleta da fração flotada, separando-se assim a FLIA. A solução de NaI utilizada foi reaproveitada, após a remoção do carbono solúvel, com agitação e uso de carvão ativado da marca Merck e posterior filtração. O ajuste da densidade da solução foi feito com densímetro convencional ($\rho = 1,80 \text{ g cm}^{-3}$). A amostra de solo residual que corresponde às FPs foi utilizada no fracionamento granulométrico.

2.3.2. Fracionamento granulométrico

Após as extrações das FLs, as FPs foram separadas por granulometria, também de acordo com metodologia elaborada por Sohi *et al.*,³⁹ e adaptada por Campos e Machado.³⁸ Adicionou-se 0,5 g de $(\text{NaPO}_3)_6$ da marca Merck à amostra residual obtida das réplicas e fez-se agitação horizontal por uma noite em um agitador horizontal, visando-se à dispersão total da amostra do solo. A fração orgânica associada à areia ($> 53 \mu\text{m} - F_{\text{Areia}}$) foi obtida por peneiramento úmido, sendo lavada abundantemente com água e coletada em becher de vidro previamente pesado.

As frações associadas ao silte ($2-53 \mu\text{m} - F_{\text{Silte}}$) e argila ($0-2 \mu\text{m} - F_{\text{Argila}}$), foram obtidas por sedimentação em proveta de 1000 mL pelo método da alíquota com base na lei de Stokes. Após a homogeneização na proveta de 1.000 mL, retirou-se uma alíquota, que representava a fração 0-53 μm . Após um período de 4 horas a 25 °C, retirou-se uma segunda alíquota (5 cm superficiais na proveta), que representa a fração 0-2 μm . Assim, nesse método, a F_{Silte} (2-53 μm) foi determinada por diferença entre a massa total encontrada (silte+argila) após a homogeneização e a quantidade de F_{Argila} isolada. Então, a fração total e a F_{Argila} foram centrifugadas a 2.000 rpm por 15 minutos sob 20 °C em uma centrífuga refrigerada marca International Equipment Company e modelo B-22M, removendo-se depois o sobrenadante e transferindo-se a fração para um becher de vidro previamente pesado.

2.4. Determinação das concentrações de C e N nas frações físicas do solo

Após os respectivos fracionamentos físicos (densimétrico e granulométrico) foram obtidas cinco frações da matéria orgânica: Fração Leve Livre (FLL), Fração Leve Intra-Agregado (FLIA), Fração Areia (F_{Areia}), Fração Silte (F_{Silte}) e Fração Argila (F_{Argila}). Posteriormente, as respectivas frações foram secas em estufa a 55 °C, pesadas e pulverizadas.

A composição elementar (concentrações de C, H e N) foi determinada, em triplicata, em todas as diferentes frações físicas por intermédio de um analisador elementar automático modelo PE 2400 series II CHNS/O Analyzer da marca Perkin-Elmer, totalizando 5.400 determinações. Utilizou-se aproximadamente $2,0 \pm 1,0 \text{ mg}$ da respectiva fração do solo finamente moída (solo macerado em almofariz até a granulometria de talco) pesadas em microbalança acoplada ao equipamento. O padrão de referência usado foi a acetanilida (C: 71,09%; H: 6,71%; N: 10,36%), sendo o aparelho calibrado diariamente e as leituras das amostras alternadas por leituras de branco, na razão de um branco para cada seis amostras e de um padrão de referência para cada 15 amostras.

As concentrações de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram corrigidas para base seca, sendo realizada a quantificação do teor de umidade, porém não foi executada a quantificação do teor de cinzas nas amostras. O Desvio-Padrão Relativo (DPR%) apresentado pela técnica analítica foi de no máximo 3%.

2.5. Determinação dos estoques de C e N nas frações físicas do solo

Os estoques de carbono (EC) e de nitrogênio (EN) nas frações foram calculados multiplicando-se as respectivas concentrações de C e/ou N na fração em uma determinada profundidade pela sua densidade e profundidade. As densidades dessas amostras foram previamente apresentadas em estudos publicados por Soares *et al.*,^{9,10} Os EC e EN foram obtidos conforme pode ser observado na equação 1:

$$E_x = \frac{X \times \rho \times e}{10} \quad (1)$$

onde: $E_{(x)}$ = Estoque de C ou de N acumulado na fração (Mg ha^{-1}); X = Concentração de C ou N na fração (g kg^{-1}); ρ = Densidade do solo (kg m^{-3}) e e = Espessura da camada de solo analisada (cm).

2.6. Análises estatísticas dos resultados

O delineamento amostral foi inteiramente casualizado e apenas entre os solos P01 e P02, o que resulta em um esquema fatorial 2x4 (2 solos e 4 trincheiras). Para verificar diferenças significativas nos diferentes parâmetros nas duas áreas de TPI, foram realizadas as análises de variâncias

(ANOVA) e o teste de comparação entre médias Tukey (HSD). As análises estatísticas foram realizadas pelo uso do software *Statistica 10.0 da StatSoft*. Os resultados obtidos dos SNAs foram excluídos da análise de variância e dos testes de médias em função destes locais não comporem o desenho estatístico usado para avaliar o efeito da MOS em TPIs, desse modo as médias dos diversos atributos avaliados nas áreas de SNAs são apresentadas somente com seus respectivos desvios-padrão e apenas como caráter meramente informativo, para fins de áreas-controle sob vegetação secundária na Região Amazônica.

3. Resultados e Discussão

3.1. Constituição mássica das frações físicas dos solos

3.1.1. Contribuição das frações físicas leves

Ao serem comparadas, as FLs das duas áreas de TPI (P01 e P02) foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) somente nas distribuições das contribuições mássicas da FLL, e em apenas duas das sete camadas avaliadas (Tabela 2). A área P02 apresentou teores de FLL cerca de quatro vezes acima ao observado

Tabela 2. Distribuição mássica das frações físicas dos solos avaliados

| Profundidade (cm) | FLL | FLIA | F _{Areia} g kg ⁻¹ | F _{Silte} | F _{Argila} | R (%) | ρ* (kg m ⁻³) |
|---|--------|---------|--|--------------------|---------------------|--------|--------------------------|
| P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | | | | |
| 0-5 | 20±5a | 11±11a | 746±37a | 58±2a | 168±45a | 103±8a | 1,1 |
| 5-10 | 14±4a | 11±9a | 759±47a | 55±1a | 170±2a | 104±9a | 1,2 |
| 10-20 | 9,2±2a | 13,3±3a | 747±34a | 59±2a | 181±9a | 101±3a | 1,2 |
| 20-40 | 14±6a | 7±2a | 749±24a | 59±2a | 181±9a | 103±5a | 1,3 |
| 40-60 | 4±1a | 5±2a | 803±53a | 47±13a | 160±30a | 98±4 | 1,3 |
| 60-80 | 6±2a | 8±2a | 772±71a | 31±3a | 185±5a | 97±3a | 1,4 |
| 80-100 | 5±3a | 9±5a | 670±38a | 39±1a | 258±20a | 98±3a | 1,5 |
| P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | | | | |
| 0-5 | 79±18b | 9±1a | 751±77a | 49±3a | 170±18a | 106±3a | 1,0 |
| 5-10 | 22±5a | 10±2a | 648±46b | 79±1b | 252±37b | 101±4a | 1,0 |
| 10-20 | 17±3a | 8±1a | 630±59b | 70±1b | 264±48b | 93±2a | 1,0 |
| 20-40 | 15±3a | 9±2a | 607±43b | 70±3b | 289±21b | 95±2a | 1,1 |
| 40-60 | 14±2b | 7±4a | 582±65b | 51±10a | 336±10b | 91±1a | 1,2 |
| 60-80 | 7±1a | 8±1a | 537±26b | 50±1b | 349±10b | 95±2a | 1,3 |
| 80-100 | 12±4a | 8±4a | 567±23b | 55±1b | 349±17b | 92±4a | 1,2 |
| P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa | | | | | | | |
| 0-23 | 8±0 | 8±1 | 220±61 | 424±5 | 350±20 | 101±5 | 1,4 |
| 23-38 | 7±1 | 5±1 | 215±45 | 416±5 | 350±9 | 99±8 | 1,4 |
| 38-50 | 2±1 | 6±2 | 154±61 | 469±21 | 359±3 | 93±3 | 1,4 |
| 50-77 | 2±0 | 6±3 | 140±41 | 476±6 | 368±11 | 93±4 | 1,4 |
| 77-110 | 5±1 | 2±1 | 42±15 | 397±0 | 525±1 | 97±6 | 1,3 |
| 110-200 | 2±12 | 3±1 | 114±60 | 380±20 | 507±18 | 101±5 | 1,3 |
| P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa | | | | | | | |
| 0-10 | 31±3 | 4±2 | 398±87 | 144±9 | 426±24 | 100±2 | 1,2 |
| 10-25 | 8±1 | 5±3 | 96±11 | 116±5 | 785±12 | 91±7 | 1,1 |
| 25-70 | 3±1 | 4±3 | 81±16 | 86±7 | 827±20 | 89±2 | 1,1 |
| 70-120 | 4±1 | 6±4 | 85±11 | 66±2 | 848±3 | 101±3 | 1,1 |
| 120-200 | 3±1 | 8±3 | 82±2 | 95±5 | 819±17 | 90±4 | 1,1 |
| P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa | | | | | | | |
| 0-30 | 10±2 | 11±1 | 761±35 | 78±2 | 136±9 | 99±3 | 1,2 |
| 30-50 | 11±1 | 13±5 | 747±14 | 77±4 | 151±39 | 110±6 | 1,5 |
| 50-96 | 2±1 | 1±1 | 650±34 | 69±3 | 248±17 | 97±3 | 1,4 |
| 96-140 | 2±0 | 3±1 | 559±27 | 146±11 | 290±15 | 95±4 | 1,6 |
| 140-200 | 1±0 | 1±0 | 507±41 | 230±7 | 248±15 | 99±5 | 1,6 |

FLL: Fração Leve Livre. FLIA: Fração Leve Intra-Agregado. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ($p < 0,05$). *Densidades do solo (ρ) obtidas por Soares et al.¹⁰

para a P01 na camada mais superficial (0-5 cm) e 2,3 vezes acima ao que é contido na quinta camada (40-60 cm), demonstrando que para essa localidade e profundidades os resíduos vegetais oriundos de fontes naturais (serrapilheira) e/ou de fontes antrópicas pré-Colombianas (restos de fogueiras e de alimentos; carvões etc.) favorecem uma maior proteção física da FLL. Essa constatação é de certa forma surpreendente, pois Soares *et al.*,¹⁰ ao avaliarem os perfis pedológicos completos (200 cm de profundidade) em P01 e P02 identificaram que os Horizontes A (antrópicos) nessas áreas apresentavam espessuras de 82 cm para a área P01 e 58 cm para área P02, e possuíam evidências visuais abundantes de materiais líticos, fragmentos cerâmicos e partículas grandes (> 2 mm) e pequenas (< 2 mm) de carvão até uma profundidade de 58 cm (A3) para P01 e 32 cm (A3) para P02, respectivamente.¹⁰

Deve-se destacar que a área P01 possui o Horizonte A mais drenado (0–82 cm: classe textural Franco-Arenosa), enquanto a área P02 possui um Horizonte A menos espesso com igual drenagem de P01 na camada (0-5 cm: classe textural Franco-Arenosa) e drenagem menos acentuados nos demais horizontes antrópicos (5-58 cm: classe textural Franco-Argilo-Arenosa); e estes dois solos são classificados como altamente intemperizados.¹⁰ Logo, pode-se deduzir que essas áreas apresentam características que favoreçam o transporte em profundidade por eluviação, mas também por outros processos de transporte de matéria, como a turbacão e a bioturbação. Segundo Glaser *et al.*,¹⁷ é bem conhecido que em áreas de TPIs a bioturbação é uma das responsáveis pelo deslocamento em profundidade de fragmentos cerâmicos e pedaços de carvões, pois a alternância entre o plantio e o pousio favorecem uma pedoturbação profunda pelo movimento das raízes, microorganismo e térmitas presentes no solo.

O alto grau de intemperização,¹⁰ eluviação de argila,¹⁰ histórico de uso agrícola intenso relativamente recente (antes do pousio),⁹⁻¹¹ pouca quantidade de agregados de tamanhos grandes,⁹ assim como a presença de registros pré-Colombianos (carvão e cerâmica) permitem deduzir que embora as áreas P01 e P02 estejam distantes a poucas centenas de metros uma da outra e com somente 10 anos de diferença de pousio entre si, isso foi o suficiente para uma forte diferenciação na dinâmica da estocagem e distribuição de FLs entre ambas. Sabe-se que em TPI parcela significativa da MOS (> 35%) é composta por partículas de carvões de origem natural e antrópica,^{2,8-12,20,44,45} que por sua vez representam a parte mais intacta (menos decomposta) do *Black Carbon* que podem ser preservados no solo por centenas ou milhares de anos.^{5,17,27,32,37,46,47} Segundo Christensen,³² as FLs são sensíveis às flutuações espaciais e sazonais do aporte de serrapilheira nos solos em geral, mas também refletem a entrada de material de origem pirogênica (*Black Carbon*) que nas TPIs podem representar mais de 30% da MOS nas FLs.^{17,32,37,46}

Logo, considerando-se a natureza mais recalitrante do *Black Carbon* que compõe significativamente as FLs em

TPIs em grandes profundidades,^{11,17,32,37} pode-se deduzir que mesmo sendo duas áreas que foram expostas sob cultivo agrícola intenso por anos,^{10,11} o aporte de material vegetal pela serrapilheira original da floresta, somado ao aporte de material pirogênico pelos povos pré-Colombianos, permitiu que essas FLs se translocassem em grandes profundidades sem serem decompostas química ou biologicamente e sem serem preservadas no interior dos agregados do solos.^{30,46} Haja visto a baixa capacidade das MOS em fornecer um efeito cimentante nos agregados desses solos conforme apontado por Soares *et al.*,⁹ pela não diferenciação entre os teores de FLIA (Tabela 2), que nesse caso específico apresentam-se mais facilmente mineralizáveis e menos protegidas por um sistema radicular denso.²⁹

Comparando-se com as áreas SNAs (P03, P04 e P05), a P02 foi a que apresentou a maior contribuição mássica nas FLs (Tabela 2). Este resultado pressupõe um sistema florestal mais denso para esta área, onde o acúmulo de FLs é favorecido em solos continuamente vegetados com elevado retorno da serrapilheira, sendo exemplo deste comportamento os solos florestais e de pastagens permanentes, ou um indício indireto da preservação de grandes estoques de carvões de origem natural ou antrópica translocados ao longo dos perfis P01 e P02.

De acordo com Christensen,³³ o acúmulo de FL é influenciado pelo manejo e uso da terra, tipo de vegetação e outros fatores que alteram o balanço entre a produção e a decomposição da MOS; por exemplo, clima, propriedades do solo e atividade da fauna edáfica. Por sua vez, os SNAs sugerem uma baixa adição de material orgânico fresco, como demonstrado pelos baixos teores de FLs, indicando serem submetidos de forma mais intensa aos processos erosivos com mineralização mais efetivas ou possuírem menor contribuição de carvões¹⁷ e de aporte vegetal intermitente como é observado normalmente em SNAs sob florestas primárias, secundárias ou sob cultivo na Região Amazônica.^{2,4,8,11,12,17,29,37,46} Logo, como era de se esperar, os SNAs P03, P04 e P05 nas subcamadas menos superficiais mostraram contribuições extremamente baixas para as FLs, sendo um comportamento típico de solos amazônicos onde o predomínio de FLs são evidenciados nas camadas superiores devido à sua proximidade com a fonte de serrapilheira,⁵ não reproduzindo a estabilidade com a profundidade apresentada pelas TPIs para este parâmetro. Para as camadas mais profundas restantes, observou-se que nas TPIs as variações de FLLs não foram bruscas, mantendo até mesmo valores elevados e semelhantes, diferente do apresentado pelos solos SNAs.

3.1.2. Contribuição das frações pesadas

Como era de se esperar, e de maneira um tanto óbvia, todas as TPIs e SNAs avaliados tiveram as contribuições mássicas predominantes nas FPs (constituintes minerais das matrizes dos respectivos solos), Tabela 2. Além disso, foi observado o predomínio da F_{Areia} em todas as profundidades das áreas P01, P02 e P05; F_{Silte} ao longo das

três primeiras camadas da área P03; e F_{Argila} em todas as camadas da área P04 e nas duas últimas camadas da área P03. Assim como observado neste estudo, Lemos *et al.*,¹⁸ ao estudarem TPIs e SNAs (Latosolos) da Floresta de Caxiuanã (PA) identificaram o predomínio da fração areia em todos os horizontes pedogênicos.¹⁸ Solos de TPIs sob cultivo de Citrus na região de Manacapuru (AM) (sul do Amazonas) também apresentaram predomínio da F_{Areia} em todas as profundidades.⁸ Soares *et al.*,^{9,10} também indicaram que as menores concentrações de argila nas camadas mais superficiais dessas TPIs pode ser um indício de processo ativo de podzolização (translocação/eluviação de argila), concomitante à uma acentuada destruição das argilas, alto grau de intemperização, ou estar relacionado ao contínuo uso do fogo para a carbonização de material superficial (queima de serrapilheira ou adição de carvões),¹⁰ que poderiam até mesmo fundir partículas organo-minerais bastante estáveis em tamanho próximo da fração areia.^{9,10}

Com exceção da camada mais superficial (0-5 cm), a área P01 mostrou possuir uma contribuição mássica de F_{Areia} estatisticamente superior ($p < 0,05$) àquelas apresentadas pela área P02 (14-30%), que por sua vez apresentou superioridade estatística ($p < 0,05$) nas F_{Silte} e F_{Argila} (28-30% e 33-47%, respectivamente), quando comparadas aos teores apresentados na área P01. Glaser *et al.*,¹⁷ ao avaliarem TPIs e latossolos adjacentes identificaram teores de FLs e FPs das TPIs muito acima daqueles apresentados pelos respectivos SNAs adjacentes.

Assim como observado por Glaser *et al.*,¹⁷ as recuperações totais das frações de solos (R%) foram satisfatórias ao variarem entre 89 e 110% (Tabela 2). Sendo que as $R(\%) > 100\%$ podem ser devido à remoção incompleta de NaI ou pela geração de artefatos devido ao excessivo número de etapas de manipulação nesse método analítico de extração da MOS.⁴²

3.2. Concentrações de C e N nas frações físicas dos solos

As concentrações de carbono e nitrogênio encontradas nas cinco diferentes áreas avaliadas podem ser consideradas como características da composição e estrutura das respectivas frações em relação ao material de origem (natural ou antrópico). Resumidamente, em relação às FLs foi observado que as concentrações de C e N nas FLLs foram mais elevadas do que nas FLIAs; sendo verificada uma tendência mais heterogênea nas FPs, onde as concentrações de C e N obedeceram às seguintes sequências: $F_{\text{Areia}} > F_{\text{Silte}} > F_{\text{Argila}}$ para carbono e nitrogênio nas TPIs e $F_{\text{Silte}} > F_{\text{Argila}} > F_{\text{Areia}}$ para o C e N nos SNAs, assim como pode ser observado nas Tabelas 3 e 4 e Figuras 1 e 2.

3.2.1. Concentrações de C e N nas frações leves

As concentrações de C variaram de 0,10 à 26,3 g kg⁻¹ e as de N variaram de 0,01 à 0,92 g kg⁻¹ ao se avaliarem as FLs das duas TPIs (Tabela 3). Além disso, foi observada uma mesma tendência entre as áreas P01 e P02: altas

concentrações de carbono e nitrogênio ($[C] > 2,0$ g kg⁻¹ e $[N] > 0,10$ g kg⁻¹) nas FLLs das camadas mais superficiais e queda brusca ($[C] < 2,0$ g kg⁻¹ e $[N] < 0,10$ g kg⁻¹) nas concentrações de C e N a partir da quarta camada (20-40 cm); assim como foi notada queda suave em profundidade nas concentrações de C e N contidos nas FLIAs de ambas as áreas. Ao serem comparadas as concentrações de C e N, por camada, nas FLs das duas áreas de TPI (P01 e P02) foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na camada mais superficial (0-5 cm) na qual a concentração de C e N presentes na FLL da área P02 estiveram cerca de três e 8,4 vezes acima das concentrações observadas para esses dois elementos na mesma camada e FL em P01. Além disso, foi observado que a área P02 apresentou uma concentração de N na FLL da terceira camada (20-40 cm) três vezes superior ao determinado para igual camada e fração na área P01 (Tabela 3). Não obstante, não foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) para os demais casos ao se compararem as concentrações de C e N nas FLs entre P01 e P02. Geralmente, por possuírem valores mais elevados de pH e fósforo seria esperado uma maior decomposição da MOS,¹⁰ mas a presença de *Black Carbon* nesses solos deve conferir uma alta estabilidade do C perante a decomposição microbiana.³¹

Para os SNAs foi observado que as concentrações de C variaram de 0,10 à 12,7 g kg⁻¹ e as de N variaram de 0,01 à 0,66 g kg⁻¹, ao se avaliarem as FLs das áreas P03, P04 e P05 (Tabela 3). Geralmente, as concentrações mais elevadas de C e N nos SNAs se restringiram aos dois primeiros horizontes pedológicos mais superficiais das áreas P04 e P05 e somente 12,5% do total de amostras avaliadas para C e 18,75% das amostras avaliadas para N, nos SNAs, apresentaram altos valores para esses elementos ($[C] > 2,0$ g kg⁻¹ e $[N] > 0,10$ g kg⁻¹) e somente nas respectivas FLLs. Além disso, foi notada uma mesma tendência para os SNAs: as concentrações de C e N foram baixas e, relativamente, homogêneas ao longo dos perfis, principalmente na FLIA (Tabela 3).

As concentrações de C nas FLs das TPIs estiveram muito próximas das concentrações identificadas nessas mesmas frações em Latossolos Amarelos com distintos usos no estado do Amazonas (floresta primária, pasto, sucessão secundária e sistema agroflorestral).²⁹ Além disso, as concentrações de C na FLL de solos amazônicos costumam servir como indicadores sensíveis de manejo inadequado, pois normalmente o carbono dessa fração costuma ser o mais facilmente liberado para a atmosfera sobre a forma de CO₂, com isso servindo como atributo diagnóstico importante na qualidade do manejo da MOS em curto prazo, sendo o oposto evidenciado nas FPs.⁴

As concentrações de C na FLL da primeira camada (0-5 cm) da área P02 estiveram apenas 3% abaixo daqueles valores apresentados por Glaser *et al.*,¹⁷ na FL da camada 0-10 cm em uma das TPIs avaliadas. Contudo, foram superiores aos encontrados por Marques *et al.*,²⁹ nas camadas mais profundas (>40 cm) de Latossolos Amarelos argilosos

Tabela 3. Concentrações de carbono e nitrogênio nas frações leves dos solos

| Profundidade (cm) | Frações Leves | | | |
|---|---------------|------------|------------|------------|
| | FLL | | FLIA | |
| | C | N | C | N |
| (g kg ⁻¹) | | | | |
| P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | |
| 0-5 | 8,6±1,7a | 0,11±0,10a | 0,99±0,62a | 0,03±0,03a |
| 5-10 | 4,1±1,4a | 0,11±0,06a | 0,75±0,39a | 0,02±0,01a |
| 10-20 | 1,9±0,5a | 0,10±0,01a | 0,48±0,11a | 0,02±0,02a |
| 20-40 | 2,0±0,6a | 0,02±0,01a | 1,30±0,89a | 0,02±0,02a |
| 40-60 | 1,2±0,2a | 0,03±0,01a | 0,20±0,03a | 0,03±0,01a |
| 60-80 | 0,9±0,2a | 0,02±0,02a | 0,40±0,15a | 0,01±0,02a |
| 80-100 | 0,4±0,3a | 0,01±0,01a | 0,10±0,08a | 0,01±0,01a |
| P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | |
| 0-5 | 26,3±4,5b | 0,92±0,29b | 1,10±0,67a | 0,03±0,01a |
| 5-10 | 5,5±4,3a | 0,12±0,01a | 1,00±0,19a | 0,03±0,01a |
| 10-20 | 4,1±1,6a | 0,07±0,02a | 1,10±0,30a | 0,02±0,01a |
| 20-40 | 1,9±0,6a | 0,06±0,01b | 0,60±0,16a | 0,03±0,01a |
| 40-60 | 1,6±0,6a | 0,03±0,01a | 0,90±0,48a | 0,02±0,02a |
| 60-80 | 1,0±0,3a | 0,02±0,01a | 0,50±0,15a | 0,02±0,01a |
| 80-100 | 0,6±0,1a | 0,02±0,01a | 0,20±0,02a | 0,02±0,02a |
| P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa | | | | |
| 0-23 | 1,5±0,6 | 0,05±0,01 | 0,20±0,04 | 0,01±0,01 |
| 23-38 | 0,6±0,1 | 0,31±0,01 | 0,20±0,03 | 0,11±0,01 |
| 38-50 | 0,3±0,1 | 0,01±0,01 | 0,10±0,02 | 0,01±0,01 |
| 50-77 | 0,3±0,2 | 0,01±0,01 | 0,10±0,02 | 0,01±0,01 |
| 77-110 | 0,6±0,1 | 0,10±0,01 | 0,10±0,03 | 0,07±0,01 |
| 110-200 | 0,4±0,1 | 0,01±0,01 | 0,20±0,09 | 0,01±0,02 |
| P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa | | | | |
| 0-10 | 12,7±8,8 | 0,66±0,07 | 0,50±0,20 | 0,01±0,01 |
| 10-25 | 2,5±0,8 | 0,25±0,01 | 0,40±0,10 | 0,01±0,01 |
| 25-70 | 0,7±0,1 | 0,01±0,01 | 0,30±0,10 | 0,01±0,01 |
| 70-120 | 0,4±0,1 | 0,01±0,01 | 0,10±0,10 | 0,01±0,01 |
| 120-200 | 0,4±0,1 | 0,02±0,01 | 0,10±0,01 | 0,01±0,01 |
| P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa | | | | |
| 0-30 | 4,9 ±0,6 | 0,51±0,03 | 0,60±0,17 | 0,05±0,04 |
| 30-50 | 2,4±0,5 | 0,65±0,01 | 0,40±0,15 | 0,01±0,01 |
| 50-96 | 0,6±0,1 | 0,01±0,01 | 0,10±0,04 | 0,01±0,01 |
| 96-140 | 0,5±0,1 | 0,06±0,01 | 0,10±0,03 | 0,01±0,01 |
| 140-200 | 0,2±0,1 | 0,01±0,01 | 0,10±0,01 | 0,01±0,01 |

FLL: Fração Leve Livre. FLIA: Fração Leve Intra-Agregado. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ($p < 0,05$).

sob floresta primária, pasto, sucessão secundária e sistema agroflorestal no Amazonas.

As concentrações de N apresentaram-se baixas para todas as áreas impossibilitando uma análise mais minuciosa do seu efeito na composição da FLIA. Supõe-se que mesmo apresentando maior aporte de material orgânico, que pode

ser associado à proteção física mais efetiva nas áreas de TPIs, não foram encontrados indícios do favorecimento para a elevação dos valores de nitrogênio. Conseqüentemente, verifica-se que as concentrações de C na FLL foram as que se mostraram mais sensíveis nos diferentes tipos de solos sob florestas secundárias avaliados.

3.2.2. Concentrações de C e N nas frações pesadas

As concentrações de Carbono variaram de 0,10 à 6,9 g kg⁻¹ e as de Nitrogênio de 0,05 à 0,84 g kg⁻¹ ao se avaliarem as FPs das áreas P01 e P02 (Tabela 4). Ademais, foi observado que em todas as FPs de todas as camadas a área P02 apresentou concentrações estatisticamente superiores (p < 0,05) de C e N em 57 e 33% dos casos, respectivamente. Nas FPs foi observado uma tendência na

dinâmica da MOS diferente da observada nas FLs para as TPIs, em que as concentrações de C e N apresentam uma diminuição mais suave e gradativa em profundidade em que as duas áreas apresentaram altas concentrações de C e N ([C] > 2,0 g kg⁻¹ e [N] > 0,10 g kg⁻¹) praticamente em todas as camadas (≈ 83%). Tanto para C quanto para o N foi observado que a F_{Areia} é a que possui as maiores concentrações de C e N nas duas áreas e foi observada a

Tabela 4. Concentrações de carbono e nitrogênio nas frações pesadas dos solos

| Profundidade (cm) | Frações Pesadas | | | | | |
|---|--------------------|-------------|--------------------|------------|---------------------|------------|
| | F _{Areia} | | F _{Silte} | | F _{Argila} | |
| | C | N | C | N | C | N |
| (g kg ⁻¹) | | | | | | |
| P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | | | |
| 0-5 | 3,2±0,3a | 0,33±0,27a | 5,6±0,5a | 0,24±0,03 | 2,9±0,5a | 0,10±0,04a |
| 5-10 | 4,0±0,9a | 0,63±0,02a | 4,9±0,2a | 0,10±0,04a | 1,9±0,1a | 0,29±0,04a |
| 10-20 | 6,9±0,8a | 0,67±0,23a | 4,0±0,1a | 0,10±0,07a | 2,0±0,1a | 0,14±0,09a |
| 20-40 | 5,1±0,5a | 0,47±0,70a | 3,4±0,3a | 0,05±0,04 | 1,5±0,2a | 0,08±0,04a |
| 40-60 | 4,3±0,2a | 0,35±0,19a | 0,1±0,1a | 0,11±0,06a | 1,2±0,1a | 0,11±0,11a |
| 60-80 | 4,9±1,0a | 0,35±0,54a | 0,1±0,1a | 0,09±0,05a | 1,0±0,1a | 0,09±0,05a |
| 80-100 | 2,3±0,5a | 0,41±0,48a | 0,4±0,1a | 0,06±0,05a | 0,8±0,1a | 0,05±0,01a |
| P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | | | |
| 0-5 | 6,9±0,5b | 0,55±0,24a | 2,3±0,1b | 0,09±0,01b | 2,3±0,3a | 0,43±0,19b |
| 5-10 | 5,8±0,6a | 0,53±0,20a | 4,6±0,3a | 0,07±0,03a | 2,2±0,1b | 0,32±0,20a |
| 10-20 | 6,8±0,3b | 0,84±0,53a | 4,1±0,1a | 0,11±0,04a | 3,5±0,4b | 0,29±0,17b |
| 20-40 | 4,6±0,6a | 0,21±0,28a | 5,2±0,2b | 0,23±0,05b | 2,3±0,3b | 0,27±0,35a |
| 40-60 | 3,1±0,3b | 0,34±0,47a | 2,7±0,4b | 0,14±0,02a | 1,7±0,3b | 0,16±0,23a |
| 60-80 | 1,8±0,4b | 0,23±0,10a | 1,5±0,8b | 0,07±0,03a | 1,1±0,2a | 0,09±0,07a |
| 80-100 | 1,6±0,8a | 0,10±0,61a | 0,6±0,4a | 0,09±0,04a | 1,0±0,4a | 0,06±0,03a |
| P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa | | | | | | |
| 0-23 | 0,8±0,1 | 0,59±0,56 | 7,8±0,3 | 0,76±0,31 | 2,0±0,1 | 0,90±0,60 |
| 23-38 | 0,4±0,2 | 0,37±0,19 | 6,8±0,1 | 0,42±0,02 | 1,1±0,1 | 0,69±0,52 |
| 38-50 | 0,3±0,1 | 0,36±0,14 | 5,5±0,1 | 0,61±0,26 | 0,5±0,1 | 0,59±0,33 |
| 50-77 | 0,6±0,1 | 0,28±0,13 | 4,3±0,6 | 0,67±0,28 | 0,7±0,1 | 0,97±0,09 |
| 77-110 | 0,1±0,1 | 0,47±0,53 | 3,4±0,9 | 0,29±0,05 | 0,9±0,1 | 0,85±0,27 |
| 110-200 | 0,2±0,1 | 0,44±0,53 | 2,4±0,2 | 0,50±0,24 | 0,6±0,1 | 0,53±0,57 |
| P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa | | | | | | |
| 0-10 | 2,3±0,5 | 0,97±0,14 | 9,9±1,4 | 0,56±0,05 | 2,9±0,1 | 0,69±0,27 |
| 10-25 | 0,8±0,1 | 0,49±0,20 | 4,9±0,2 | 0,39±0,10 | 3,9±0,2 | 1,43±1,81 |
| 25-70 | 0,2±0,1 | 0,50±0,25 | 1,1±0,2 | 0,30±0,15 | 4,9±0,1 | 0,97±0,95 |
| 70-120 | 0,3±0,1 | 0,98±1,62 | 1,1±0,1 | 0,18±0,08 | 3,1±0,1 | 0,84±0,26 |
| 120-200 | 0,3±0,1 | 1,10±1,61 | 2,0±0,2 | 0,36±0,09 | 1,6±0,1 | 0,87±0,40 |
| P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa | | | | | | |
| 0-30 | 3,1±0,1 | 1,01±2,43 | 3,4±0,1 | 0,06±0,03 | 1,5±0,1 | 0,34±0,83 |
| 30-50 | 2,9±1,2 | 1,30±1,45 | 2,3±0,1 | 0,06±0,04 | 1,6±0,2 | 0,19±0,13 |
| 50-96 | 1,6±0,8 | 1,43±3,26 | 2,1±0,1 | 0,20±0,01 | 0,3±0,1 | 0,10±0,07 |
| 96-140 | 1,2±0,4 | 1,0±0,62 | 1,1±0,1 | 0,28±0,15 | 1,0±0,2 | 0,07±0,05 |
| 140-200 | 0,7±0,1 | 1,08 ± 1,87 | 2,0±0,1 | 0,50±0,07 | 0,4±0,2 | 0,06±0,06 |

Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra em uma mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância (p < 0,05).

seguinte sequência de acúmulo desses elementos: $F_{\text{Areia}} > F_{\text{Silte}} > F_{\text{Argila}}$.

Para os SNAs foi observado que as concentrações de C variaram de 0,10 à 9,9 g kg⁻¹ e as de N variaram de 0,06 à 1,46 g kg⁻¹, ao se avaliarem as FPs das áreas P03, P04 e P05 (Tabela 3). Assim como observado para as FLs, as maiores concentrações de C e N nas FPs dos SNAs se restringiram à F_{Silte} situada nos dois primeiros horizontes pedológicos mais superficiais das áreas P04 e P05. Contudo, em P03 foi observado altos valores de Carbono e Nitrogênio ($[C] > 2,0$ g kg⁻¹ e $[N] > 0,10$ g kg⁻¹) na F_{Silte} ao longo de todo o perfil, indicando um processo de complexação organo-mineral não tão acentuado.¹⁷ Foi observado que, tanto para o C quanto para o N, os SNAs possuem sequências distintas no acúmulo desses elementos nas FPs:

| | | |
|------|-------------|---|
| P03: | Carbono: | $F_{\text{Silte}} > F_{\text{Argila}} > F_{\text{Areia}}$ |
| | Nitrogênio: | $F_{\text{Argila}} > F_{\text{Silte}} > F_{\text{Areia}}$ |
| P04: | Carbono: | $F_{\text{Silte}} > F_{\text{Argila}} > F_{\text{Areia}}$ |
| | Nitrogênio: | $F_{\text{Areia}} > F_{\text{Argila}} > F_{\text{Silte}}$ |
| P05: | Carbono: | $F_{\text{Silte}} > F_{\text{Areia}} > F_{\text{Argila}}$ |
| | Nitrogênio: | $F_{\text{Areia}} > F_{\text{Silte}} > F_{\text{Argila}}$ |

Grande parte da MOS presente na matriz mineral dos solos é independente do material parental e é diretamente relacionada às diversas fontes de C e N da vegetação que cresce sobre o solo,²⁹ pelas práticas de manejo e no caso específico das TPIs pelo *Black Carbon*. Além disso, as maiores concentrações de C e N nas frações mais finas da FP (F_{Silte} e F_{Argila}) dos SNAs indicam que por possuírem áreas superficiais específicas maiores terão maior capacidade em interagir com a MOS que se apresenta bastante humificada nessas FPs.

3.3. Distribuição de C e N nas frações físicas do solos

De posse das concentrações de C e N nas FLs e FPs (Tabelas 3 e 4) foram convertidas as massas desses analitos (C e N) em função da massa de solução (solos) para determinar a distribuição percentual mássica (%) em profundidade de cada um desses dois elementos, conforme pode ser observado nas Figuras 1 e 2.

De modo geral, pode-se observar que as FLs com destaque para a FLL são responsáveis por frações significativas do C nesses cinco solos avaliados, mesmo embora as massas das FLs somadas estejam entre 0,2 e 8,8% da constituição mássica total desses solos (Tabela 2). Tanto para as TPIs, quanto para as áreas P04 e P05 as FLLs se mostraram como fontes extremamente importantes de C, principalmente nas duas camadas mais superficiais. Por outro lado, no solo P03 as contribuições de C pelas FLs foram muito baixas, diante o predomínio da F_{Silte} como principal compartimento de carbono nessa área, o que pode servir de indício que essa área foi mais impactada previamente, ou que o pousio não está oferecendo a mesma magnitude e velocidade de aporte de debrís vegetal que as outras áreas, pois as FLs são as

frações mais rapidamente alteradas pelo manejo do solo, quando comparadas com o C presente nas F_{Silte} e F_{Argila} que possuem uma MOS mais estável.²⁹

O C(%) nas FLs das TPIs e SNAs desse estudo estão muito próximos daqueles obtidos por Glaser *et al.*,¹⁷ na qual identificaram que as FLs podem ser responsáveis por uma expressiva contribuição ao carbono do solo nas TPIs avaliadas em Manaus e Santarém ($C\% = 14-85\%$ na camada 0-10 cm e $C\% = 11-52\%$ na camada 30-40 cm), contrastando com os menores valores em Latossolos adjacentes ($C\% = 13-39\%$ na camada 0-10 cm e $C\% = 3-30\%$ na camada 30-40 cm). Geralmente, a F_{Areia} é associada com a MOS mais livre e lábil, desempenhando uma enorme importância na ciclagem de nutrientes do solo.²⁹ Nos solos arenosos P01, P02 e P05 avaliados nesse estudo foi observado que a contribuição das FPs para a MOS tende a ser incrementada diretamente com o aumento da profundidade, o que poderia estar relacionado com o aumento da argila eluviada das camadas mais superficiais para as mais profundas.¹⁷ É conhecido que o teor de MOS é diretamente relacionado ao conteúdo de $F_{\text{Silte}} + F_{\text{Argila}}$ em solos arenosos, o que poderia explicar porque as FLs são quantitativamente mais importantes em solos arenosos do que em solos argilosos.¹⁷

Ao contrário desse estudo, resultados obtidos em Latossolos argilosos sob florestas tropicais primárias encontraram carbono estocado principalmente nas frações mais lábeis das camadas superficiais (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) e nas FPs nas camadas profundas (> 40 cm), assim como as seguintes variações percentuais de C total na MOS: $C\% = 2-4\%$ na F_{Areia} ; $C\% = 39-45\%$ na F_{Silte} e $C\% = 51-59\%$, respectivamente.⁴ Liang *et al.*, sugerem que tanto a recalcitrância química, quanto as interações com a matriz mineral podem contribuir com a estabilidade de *Black Carbons* em solos TPIs e SNAs. Segundo Marques *et al.*,^{4,29} nas florestas primárias da Amazônia os estoques de C podem ser drasticamente reduzidos, devido às altas temperaturas, pluviosidade e intensa atividade biológica da fauna edáfica que proporcionam rápida decomposição da MOS. Logo, as altas porcentagens de C e N nas FLLs das camadas mais superficiais, como é o caso do presente estudo, reforçam a necessidade da preservação das TPIs sob floresta, pois do contrário os estoques de C e N diminuirão significativamente por processos de mineralização da MOS gerando altas taxas de emissões fugitivas de CO₂ para a atmosfera, agravando com isso as mudanças climáticas globais sob a forma de um *feedback* positivo.

Segundo Christensen,³³ as frações mais humificadas da MOS, geralmente contidas nas FPs costumam contribuir com mais de 70% da MOS. Contudo, nesse estudo pode-se verificar que as FLs, que proporcionam uma MOS mais lábil, têm papel significativo no aporte de C nas camadas superficiais de solos sob florestas secundárias da Região Amazônica, com exceção da área P03, que ao que tudo indica possui uma MOS altamente humificada e preferencialmente retida (> 60%) na fração mineralógica predominante (F_{Silte})

Determinação dos Estoques de Carbono e Nitrogênio nas Frações Físicas da Matéria Orgânica em Solos Antrópicos (Terra Preta de Índio) e Não Antrópicos da Amazônia Central

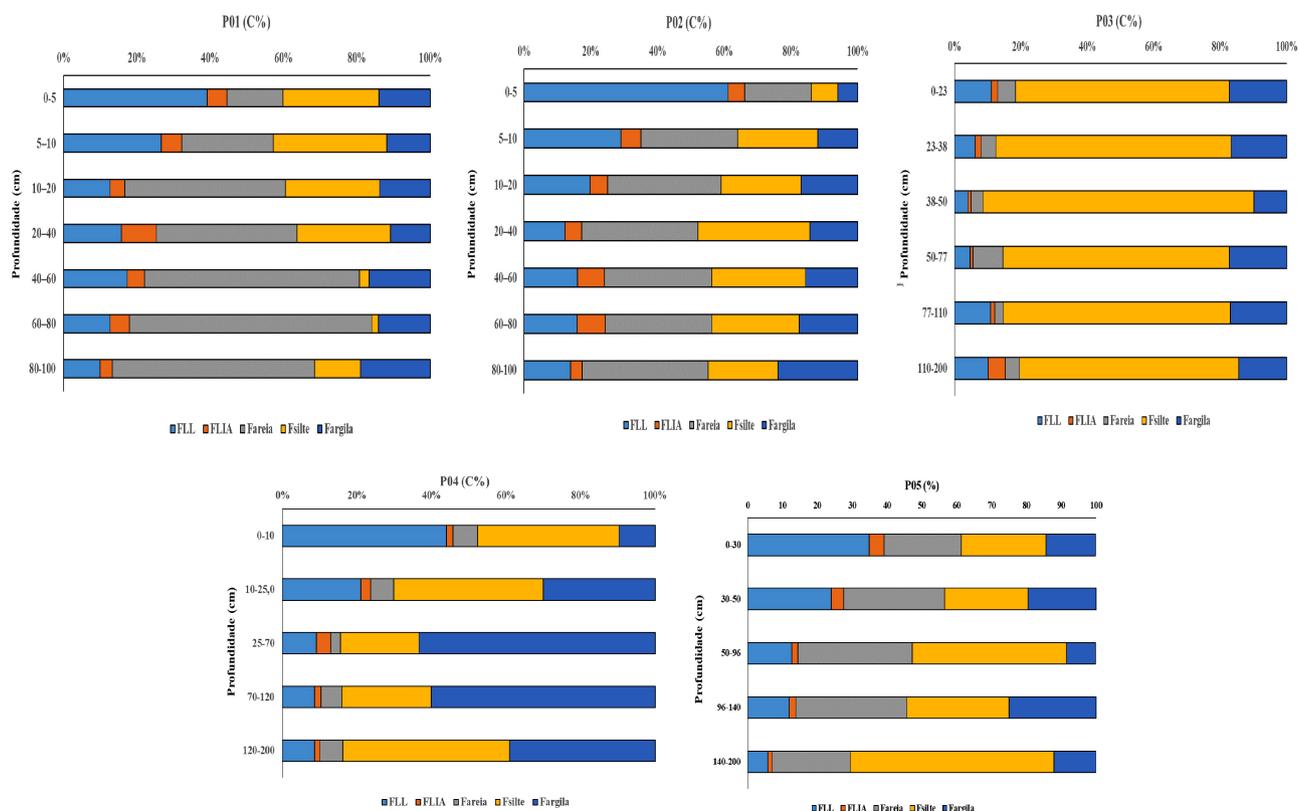


Figura 1. Distribuição de Carbono entre as frações físicas dos solos.

deste solo. Geralmente, na Amazônia altas proporções de C e N nas FLs superficiais são características que distingue os ecossistemas florestais daqueles que foram impactados por atividades agrícolas, que costumam apresentar o C e o N mais enriquecidos nas FPs devido ao menor aporte de biomassa e serrapilheira superficiais, assim como à maior exposição do solo devido ao uso intensivo.⁴ Tipicamente, espera-se que qualquer alteração no uso da terra promoverá um gradual incremento no C e N nas partículas mais finas das FPs ($F_{\text{Silte}} + F_{\text{Argila}}$), tanto superficialmente quanto em profundidade, proporcionando uma maior proteção desses elementos ao ataque da atividade microbiana do solo.

Embora a MOS seja composta também por nitrogênio, não foi observada a mesma tendência apresentada pelo carbono (Figura 2). Geralmente, com exceção da primeira camada mais superficial da área P02, que contribuiu com mais de 40% de N nas FLs, esse elemento se apresentou mais associado às FPs em todas as camadas das demais áreas. Pode-se supor que mesmo apresentando maior aporte de material orgânico, que pode ser associado à proteção física mais efetiva nas áreas de TPIs, não foram encontrados indícios do favorecimento para a elevação dos valores de N devido à natureza da MOS.

3.4. Relação C:N nas frações físicas dos solos

A relação C:N pode ser considerada um parâmetro importante no estudo da dinâmica da MOS, até mesmo podendo servir como um indicador da estabilidade da

respectiva fração física. Como era de se esperar, a relação C:N da FLL variou de 4,2 na área P03 a 69,9 na área P01 (Tabela 5), sendo esses resultados muito discrepantes com valores de relação C:N típicos para esta fração em solos de clima tropical.³⁹ As áreas P01 e P02 foram as que apresentaram os maiores valores desta relação e não diferiram estatisticamente entre si ($p < 0,05$), sugerindo quem em TPIs as altas relações C:N são um reflexo de maiores acúmulos de carbono quando comparados a SNAs típico da Amazônia, contribuindo desta forma mais efetivamente para um maior sequestro de carbono, ou que nessas áreas existe uma menor atividade microbiana que favorece a manutenção do carbono, e consequentemente eleva a relação C:N,³³ mesmo após tantos anos de uso intenso do solo e relativamente curtos períodos de pousio.

Na profundidade 0-5 cm, a relação C:N variou de 21,4 a 69,9 nas FLs, sendo que a relação C:N na FLL foi superior ao encontrado na FLIA, exceto nas profundidades 60-80 e 80-100 cm da área P01, quando foram atingidos valores maiores que 70 na FLIA (Tabela 5). Geralmente, a relação C:N nas FLs das TPIs foram maiores que nos SNAs e isso se deve, provavelmente, à qualidade do material adicionado ao solo pela capoeira existente ou carvões. Por outro lado, nas FPs, as relações C:N foram menores que aquelas apresentadas nas FLs, sendo natural, pois durante o processo de humificação a razão C:N diminui significativamente. Dentre as FPs a F_{Silte} foi a que apresentou os maiores valores C:N, seguidos pelos resultados obtidos para a F_{Area} e F_{Argila} , respectivamente. A estabilidade da relação C:N também

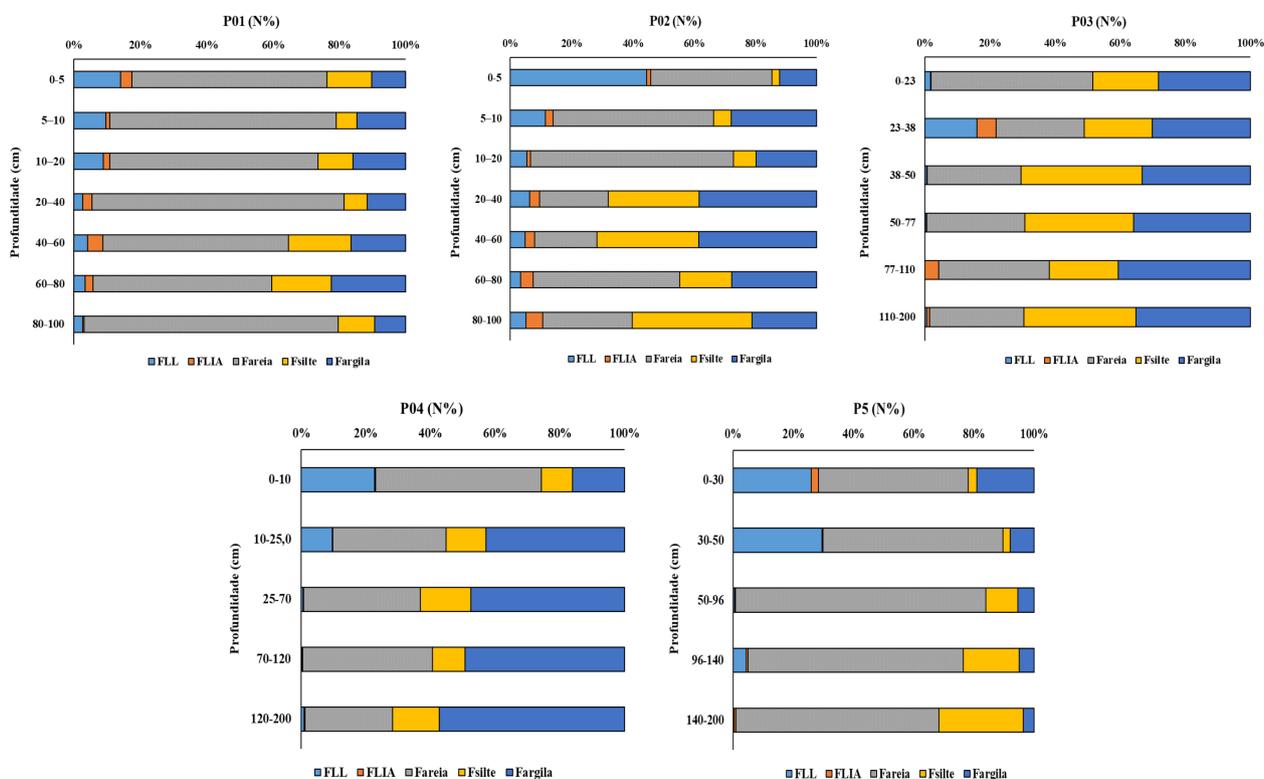


Figura 2. Distribuição de Nitrogênio entre as frações físicas dos solos.

indica, obviamente, que a dinâmica de C está relacionada com a dinâmica do N, isto é, para se aumentar o estoque de C estabilizado na fração, deve-se aumentar também o estoque de N, de acordo com a relação C:N da partícula.³³ Mesmo com as variações encontradas nas FLs das TPIs em função da profundidades, a relação C:N nas partículas finas foi mais influenciada, pois como pode ser observado na FL, com apenas dez anos a mais de pousio a área P02 apresentou condições suficientes para alterar as concentrações de C e N, assim como a relação C:N, quando comparados estatisticamente ($p < 0,05$) com a área P01.

São escassos ou praticamente inexistentes estudos que apresentem relações C:N nas diferentes frações físicas do solo em TPIs, inviabilizando, portanto, a comparação deste parâmetro com os do presente estudo.

3.5. Estoques de C e N nas frações físicas dos solos

Os estoques de Carbono variaram de $0,1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ na FLIA da área P04, a $73,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ na F_{Silte} da área P03 (Tabela 6). Por sua vez, os estoques de Nitrogênio variaram de $0,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ na FLIA da área P01 a $14,2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ m}^{-1}$ na F_{Areia} da área P05 (Tabela 7). Os estoques de C e N se comportaram de maneira praticamente idêntica nas frações físicas, sendo que os maiores estoques em um metro de profundidade foram encontrados, como era de se esperar, nas FPs em todos os solos avaliados (Tabelas 6 e 7).

Os solos representam um dos principais compartimentos de estocagem de carbono e nitrogênio na biosfera no contexto do Sistema Terra, e as estabilidades desses elementos

sob florestas tornam-se críticas quando essas áreas são desmatadas ou perturbadas, pois afetam significativamente os estoques, que tendem a um novo estado de equilíbrio devido à mudança de temperatura e outras condições quando os solos são expostos pelo desmatamento.⁴ Contudo, a renovação de aporte vegetal contínuo e fresco, sob a forma de serrapilheira, somado ao não manejo do solo em florestas secundárias pode proporcionar um ganho efetivo nos estoques de C e N que não pode ser negligenciado. No presente estudo, os estoques seguiram a seguinte ordem para o carbono: $P02 > P01 > P05 > P04 > P03$; sendo a F_{Areia} predominantes nas TPIs; F_{Silte} para os SNAs P05 e P03 e a F_{Argila} para o P04 (Tabela 6).

A preservação florestal em todos os solos avaliados é uma importante contribuição ao ecossistema da região, pois a remoção de cobertura natural e cultivo continuado nas áreas de TPIs proporcionariam um maior impacto, em um curto intervalo de tempo, aos estoques de C e N, pois o desmatamento costuma alterar mais severamente os solos arenosos do que os argilosos, reduzindo ainda mais o carbono estocado nesses solos.⁴ O carbono na F_{Areia} tem maior biodisponibilidade e apresenta uma quantidade maior de material particulado, que nessas TPIs possuem ainda a peculiaridade de serem *Black Carbon*, quando comparado ao carbono estocado nas F_{Silte} e F_{Argila} em SNAs.³³ Além disso, em solos amazônicos típicos o C quando predominante em FLL e F_{Areia} podem proporcionar solos com baixa MOS e atividade biológica, comprometendo o crescimento das plantas, perda de nutrientes, retenção de umidade, agregação e sustentabilidade do solo.⁴ Além

Determinação dos Estoques de Carbono e Nitrogênio nas Frações Físicas da Matéria Orgânica em Solos Antrópicos (Terra Preta de Índio) e Não Antrópicos da Amazônia Central

Tabela 5. Relação C:N das frações físicas dos solos

| Profundidade (cm) | FLL | FLIA | F _{Areia} | F _{Silte} | F _{Argila} |
|---|------------|------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | C/N | | | | |
| P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | | |
| 0-5 | 69,9±32,0a | 21,4±7,8a | 17,1±16,7a | 48,6±11,5a | 32,3±14,3a |
| 5-10 | 32,2±11,4a | 24,9±13,0a | 5,1±1,3a | 51,2±26,0a | 9,3±2,2a |
| 10-20 | 22,8±14,2a | 17,6±14,0a | 11,2±3,3a | 36,5±19,8a | 11,4±4,3a |
| 20-40 | 58,2±32,8a | 60,4±40,0a | 20,9±24,8a | 64,1±38,0a | 17,7±10,1a |
| 40-60 | 22,6±5,9a | 8,1±4,3a | 12,5±2,6a | 11,2±8,5a | 25,5±8,2a |
| 60-80 | 26,7±20,1a | 72,3±57,0a | 11,5±4,8a | 9,9±3,1a | 10,1±6,5a |
| 80-100 | 29,8±35,0a | 70,3±53,0a | 7,4±2,9a | 9,8±4,2a | 14,6±1,0a |
| P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico | | | | | |
| 0-5 | 28,0±3,5b | 42,6±31,0a | 9,7±4,0a | 39,8±8,7a | 9,2±5,6b |
| 5-10 | 43,2±36,0a | 55,5±23,8a | 24,8±35,4b | 64,4±29,9a | 9,0±5,1a |
| 10-20 | 38,0±20,0a | 36,5±7,4a | 9,8±5,4a | 42,8±15,1a | 13,3±6,7a |
| 20-40 | 30,5±8,0a | 55,5±24,0a | 44,8±32,4a | 18,0±3,9b | 16,1±10,0a |
| 40-60 | 41,0±16,6a | 17,2±11,6a | 21,7±22,5a | 11,0±1,1b | 11,3±12,3a |
| 60-80 | 67,7±24,0a | 32,6±22,0a | 6,3±1,9a | 21,8±11,6b | 11,2±6,8a |
| 80-100 | 18,4±4,0a | 21,7±12,0a | 19,5±15,7b | 6,7±3,9a | 23,3±18,1a |
| P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa | | | | | |
| 0-23 | 20,3±11,4 | 23,8±19,0 | 14,5±16,9 | 15,7±10,6 | 11,0±18,7 |
| 23-38 | 0,9±0,3 | 64,8±14,1 | 64,8±14,1 | 10,5±15,2 | 9,5±3,8 |
| 38-50 | 15,1±8,3 | 15,5±5,8 | 1,7±0,1 | 9,3±3,1 | 11,4±7,4 |
| 50-77 | 30,3±17,4 | 23,0±10,0 | 26,2±22,4 | 7,6± | 9,0±3,0 |
| 77-110 | 4,2±1,3 | 20,9±7,61 | 1,6±0,9 | 9,0±2,7 | 12,0±3,9 |
| 110-200 | 37,0±24,3 | 12,0±2,3 | 4,9±3,6 | 4,5±1,4 | 13,0±3,8 |
| P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa | | | | | |
| 0-10 | 17,8±1,8 | 22,8±11,4 | 7,9±4,6 | 32,0±0,9 | 14,8±5,19 |
| 10-25 | 8,8±0,2 | 67,5±9,7 | 17,6±23,7 | 15,2±5,4 | 13,6±12,5 |
| 25-70 | 57,9±20,1 | 45,1±7,61 | 2,1±1,1 | 4,4±2,7 | 15,3±14,3 |
| 70-120 | 61,1±15,8 | 54,9±14,0 | 1,1±0,8 | 6,0±2,6 | 13,3±6,21 |
| 120-200 | 13,3± 8,8 | 23,2± 5,8 | 3,2±1,3 | 5,8±0,8 | 16,6±13,7 |
| P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plúntico de textura média/argilosa | | | | | |
| 0-30 | 8,3±2,0 | 13,9±10,9 | 2,7±1,2 | 67,6±32,3 | 29,2±5,3 |
| 30-50 | 6,4±7,5 | 9,7±2,8 | 2,3±0,5 | 62,0±15,5 | 27,5±7,2 |
| 50-96 | 20,6±12,2 | 24,9±11,5 | 1,8±1,6 | 10,4±1,1 | 15,9±3,9 |
| 96-140 | 5,9±2,4 | 15,7±3,1 | 1,4±0,4 | 5,1±3,2 | 14,5±7,3 |
| 140-200 | 17,4±12,9 | 8,4±2,0 | 1,0±0,2 | 4,0±0,5 | 8,0±3,1 |

FLL: Fração Leve Livre. FLIA: Fração Leve Intra-Agregado. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ($p < 0,05$).

disso, quando solos florestais tropicais são transformados em culturas agrícolas apresentam, em média, uma perda de C de 15-40% até um metro de profundidade em período extremamente curto (2-3 anos), reduzindo a fertilidade e a capacidade produtiva dos solos, pois as atividades antrópicas quebram o equilíbrio dinâmico, reduzindo aporte de C na MOS, alterando a qualidade e favorecendo as perdas por lixiviação ou emissões fugitivas de CO₂.²⁹

Foi observado que a área P02 apresentou diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na estocagem de C nas

frações físicas do solo, quando comparada à área P01, pois apresentou uma capacidade 1,8 vez acima na estocagem de C na FLL e 1,5 vez acima na F_{Silte}, enquanto a área P01 se mostrou 1,5 vez mais eficiente em estocar C na F_{Areia}.

Por outro lado, os estoques de nitrogênio apresentaram uma tendência totalmente diferente em que os SNAs conseguiram estocar aproximadamente três vezes mais N do que as TPIs: P05 = P03 > P04 > P01 = P02; sendo a F_{Areia} predominante em P05, P02 e P01; e a F_{Argila} para o P04 e P03 (Tabela 7). Os efeitos do desmatamento e das mudanças

Tabela 6. Estoques de carbono das frações físicas do solo

| Área | FLL | FLIA | F _{Areia} | F _{Silte} | F _{Argila} | Total |
|------|-----------|----------|--------------------|--------------------|---------------------|------------|
| | | | | | | |
| P01 | 15,6±5,9a | 0,2±0,2a | 59,0±7,9a | 21,5±1,3a | 17,2±1,6a | 116,5±9,2a |
| P02 | 28,7±9,8b | 0,3±0,2a | 39,5±5,7b | 32,1±4,5b | 20,2±3,6a | 137,0±7,9b |
| P03 | 5,0±2,5 | 0,5±0,3 | 6,6±3,8 | 73,9±3,5 | 14,1±5,4 | 101,5±3,5 |
| P04 | 21,0±13,0 | 0,1±0,1 | 5,5±1,7 | 29,4±3,0 | 42,0±14,5 | 104,3±7,5 |
| P05 | 21,1±5,0 | 0,2±0,2 | 28,5±14,8 | 33,9±1,3 | 15,3±7,4 | 105,8±9,8 |

FLL: Fração Leve Livre. FLIA: Fração Leve Intra-Agregado. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ($p < 0,05$).

Tabela 7. Estoques de nitrogênio nas frações físicas do solo

| Área | FLL | FLIA | F _{Areia} | F _{Silte} | F _{Argila} | Total |
|------|----------|----------|--------------------|--------------------|---------------------|----------|
| | | | | | | |
| P01 | 0,4±0,2a | 0,2±0,2a | 5,6±2,4a | 1,1±0,6a | 1,3±0,7a | 8,6±7,0a |
| P02 | 0,9±0,4a | 0,3±0,2a | 2,7±2,4a | 1,8±0,4a | 2,6±2,0a | 8,3±5,3a |
| P03 | 1,5±0,5 | 0,7±0,3 | 3,1±1,6 | 8,7±2,6 | 11,3±6,3 | 25,3±2,3 |
| P04 | 1,7±0,7 | 0,3±0,1 | 3,9±2,2 | 4,9±1,3 | 11,4±9,0 | 22,2±3,2 |
| P05 | 3,3±2,7 | 0,3±0,2 | 14,2±8,8 | 2,5±1,3 | 5,0±7,9 | 25,3±2,5 |

FLL: Fração Leve Livre. FLIA: Fração Leve Intra-Agregado. Comparação entre as médias feitas pelo teste Tukey (HSD). Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variância ($p < 0,05$).

climáticas globais atuam diretamente no C e N estocados na FLL, que estão presentes em maior proporção nas camadas superficiais, e por isso mais suscetíveis à mineralização (emissão como CO₂, se desmatado).⁴ Tanto o C quanto o N contidos nas FPs levam mais tempo para ser liberados devido ao seu alto grau de humificação, o que proporciona uma menor taxa de mineralização em CO₂, CH₄ e N₂O com o passar do tempo.

A conversão de solos sob florestas na região Amazônica pode levar à emissão de gases de efeito estufa equivalentes à uma taxa de 1 a 9 Gt ha⁻¹ ano⁻¹ de carbono. Logo, preservar as TPIs assim como os demais SNAs sob floresta (primárias ou secundárias) torna-se uma estratégia imprescindível para manutenção do C e N estocados no solo e mitigar os efeitos deletérios das mudanças climáticas globais.

4. Conclusões

Esse estudo representa uma significativa contribuição científica ao preencher uma importante lacuna do conhecimento e, conseqüentemente, colaborar com um maior entendimento a respeito da dinâmica da matéria orgânica do solo sob florestas secundárias da Região Amazônica. Logo, estudos posteriores poderão ser desenvolvidos focando todas as cinco diferentes frações físicas (leves e pesadas) dos solos antrópicos e não antrópicos da bacia hidrográfica da Floresta Amazônica propiciando um maior entendimento a respeito da ciclagem tanto de carbono quanto de nitrogênio entre os diferentes sub-compartimentos físicos do solo.

Embora as duas áreas de Terra Pretas de Índio estejam distantes a poucas centenas de metros uma da outra, foram

observadas diferenças significativas na dinâmica da matéria orgânica devido ao dobro do tempo de pousio sob floresta secundária na área P02.

As concentrações de carbono da Fração Leve Livre demonstraram ser um atributo diagnóstico mais sensível do que o carbono contido na Fração Leve Intra-Agregado em todas as áreas avaliadas nesse estudo. A distribuição de C em profundidade demonstrou um comportamento heterogêneo, dividindo-se prioritariamente na Fração Leve Livre nas camadas mais superficiais e nas demais frações granulométricas predominantes da matriz mineralógica, conforme cada tipo de solo.

O pousio ou a conversão de áreas amazônicas intensamente cultivadas em florestas secundárias pode se constituir em uma prática sustentável para a mitigação das perdas de carbono e nitrogênio no solo, principalmente nas frações mais lábeis e reativas presentes nas camadas mais superficiais do solo.

Referências Bibliográficas

- Silva, C. M.; Arbilla, G.; Machado, W.; Soares, R.; Radionuclídeos como marcadores de um novo tempo: o Antropoceno. *Química Nova* **2020**, *43*, 506. [CrossRef]
- Desjardins, T.; Barros, E.; Sarrazin, M.; Girardin, C.; Mariotti, A.; Effects of forest conversion to pasture on soil carbon content and dynamics in Brazilian Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2004**, *103*, 365. [CrossRef]
- Durrer, A.; Margenot, A. J.; Silva, L. C. R.; Bohannan, B. J. M.; Nusslein, K.; van Haren, J.; Andreote, F. D.; Parikh, S. J.; Rodrigues, J. L. M.; Beyond total carbon: conversion of

- amazon forest to pasture alters indicators of soil C cycling. *Biogeochemistry* **2021**, *152*, 179. [[CrossRef](#)]
4. Marques, J. D. de O.; Luizão, F. J.; Teixeira, W. G.; Nogueira, E. M.; Fearnside, P. M.; Sarrazin, M.; Soil Carbon Stocks under Amazonian Forest: Distribution in the Soil Fractions and Vulnerability to Emission. *Open Journal of Forestry* **2017**, *07*, 121. [[CrossRef](#)]
 5. Glaser, B.; Birk, J. J.; State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2012**, *82*, 39. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
 6. Novotny, E. H.; Hayes, M. H. B.; Bonagamba, T. J.; Eduardo, R.; Song, G.; Nogueira, C. M.; Mangrich, A. S.; Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the Utilisation of Charcoal for Soil Amendment. *Journal of Brazilian Chemical Society* **2009**, *20*, 1003. [[CrossRef](#)]
 7. Novaes Filho, J. P.; Selva, E. C.; Couto, E. G.; Lehmann, J.; Johnson, M. S.; Riha, S. J.; Distribuição espacial de carbono em solo sob floresta primária na amazônia meridional. *Revista Arvore* **2007**, *31*, 83. [[CrossRef](#)]
 8. Chagas, L. F. B.; Falcão, N. P. S.; Padilha, F. J.; Oliveira, D. M.; Guimarães, R. S.; De Campos, D. V. B.; Walverde, E. M.; Ferreira, P. H. Z.; Soares, R.; Avaliação do Impacto do Cultivo de Citros sobre os Estoques de Carbono e Nitrogênio das Frações Leves da Matéria Orgânica de Solos Antrópicos (Terras Pretas de Índio) e Solos Adjacentes (Latossolos) da Amazônia Central. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 2067. [[CrossRef](#)]
 9. Soares, R.; Maddock, J. E. L.; Campos, D. V. B.; Madari, B. E.; Machado, P. L. O. A.; Santelli, R. E.; Avaliação da Estabilidade de Agregados em Marcadores Ambientais Terrestres do Antropoceno Submetidos a Diferentes Períodos de Pousio. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1693. [[CrossRef](#)]
 10. Soares, R.; Maddock, J. E. L.; Campos, D. V. B.; Madari, B. E.; Machado, P. L. O. A.; Santelli, R. E.; O Papel das Terras Pretas de Índio no Antropoceno. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1659. [[CrossRef](#)]
 11. Madari, B. E.; Cunha, T. J. F.; Soares, R.; Organic Matter of the Anthropogenic Dark Earths of Amazônia. *Dynamic Soil, Dynamic Plant* **2011**, *5*, 21. [[CrossRef](#)]
 12. Mello, M. L. V. C. B. de M.; Soares, R. Matéria Orgânica em Solos Arqueológicos Amazônicos: Uma Revisão. *Diversidade e Gestão* **2017**, *1*, 189. [[Link](#)]
 13. Solomon, D.; Lehmann, J.; Thies, J.; Schäfer, T.; Liang, B.; Kinyangi, J.; Neves, E.; Petersen, J.; Luizão, F.; Skjemstad, J.; Molecular signature and sources of biochemical recalcitrance of organic C in Amazonian Dark Earths. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2007**, *71*, 2285. [[CrossRef](#)]
 14. Sombroek, W.; Kern, D.; Rodrigues, T.; Cravo, M. D. S.; Cunha, T. J. F.; Woods, W.; Glaser, B.; *Em Terra preta e terra mulata: suas potencialidades agrícolas, suas sustentabilidades e suas reproduções*, Emprapa: Brasília, 2009, parte III. [[Link](#)]
 15. Zech, W.; Senesi, N.; Guggenberger, G.; Kaiser, K.; Lehmann, J.; Miano, T. M.; Miltner, A.; Schroth, G.; Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. *Geoderma* **1997**, *79*, 117. [[CrossRef](#)]
 16. Aquino, R. E. de; Marques, J.; Campos, M. C. C.; Oliveira, I. A. de; Bahia, A. S. R. de S.; dos Santos, L. A. C.; Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. *Geoderma* **2016**, *262*, 35. [[CrossRef](#)]
 17. Glaser, B.; Balashov, E.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W.; Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* **2000**, *31*, 669. [[CrossRef](#)]
 18. Lemos, V. P.; de Oliveira Meireles, A. R.; das Graças Fernandes, K.; de Moraes, M. C.; da Costa, M. L.; Silva, A. K. T.; Kern, D. C.; Nutrients in Amazonian black earth from Caxiuana region. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2011**, *22*, 772. [[CrossRef](#)]
 19. Silva, L. C. R.; Corrêa, R. S.; Wright, J. L.; Bomfim, B.; Hendricks, L.; Gavin, D. G.; Muniz, A. W.; Martins, G. C.; Motta, A. C. V.; Barbosa, J. Z.; Melo, V. de F.; Young, S. D.; Broadley, M. R.; Santos, R. V.; A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. *Nature Communications* **2021**, *12*, 127. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
 20. Lima, H. N.; Schaefer, C. E. R.; Mello, J. W. V.; Gilkes, R. J.; Ker, J. C.; Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. *Geoderma* **2002**, *110*, 1. [[CrossRef](#)]
 21. Clement, C. R.; Denevan, W. M.; Heckenberger, M. J.; Junqueira, A. B.; Neves, E. G.; Teixeira, W. G.; Woods, W. I.; The domestication of amazonia before european conquest. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **2015**, *282*, 1. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
 22. Certini, G.; Scalenghe, R.; Anthropogenic soils as the marker. *Encyclopedia of the Anthropocene* **2018**, *1*, 129-132. [[CrossRef](#)]
 23. Certini, G.; Scalenghe, R.; Anthropogenic soils are the golden spikes for the Anthropocene. *Holocene* **2011**, *21*, 1269. [[CrossRef](#)]
 24. Certini, G.; Scalenghe, R.; Is the anthropocene really worthy of a formal geologic definition? *Anthropocene Review* **2015**, *2*, 77. [[CrossRef](#)]
 25. Certini, G.; Scalenghe, R.; Holocene as Anthropocene Geological evidence for the Anthropocene. *Science* **2015**, *349*, 246. [[CrossRef](#)]
 26. Santos, L. A. C.; Aquino, M. C. C.; Bergamin, R. E.; Silva, A. C.; Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2013**, *37*, 825. [[CrossRef](#)]
 27. Glaser, B.; Prehistorically modified soils of central Amazonia: A model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **2007**, *362*, 187. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
 28. Lombardo, U.; Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. *Nature Communications* **2021**. [[CrossRef](#)]
 29. Marques, J. D. de O.; Luizão, F. J.; Teixeira, W. G.; Sarrazin, M.; Figueira Ferreira, S. J.; Beldini, T. P.; de Araújo Marques, E. M.; Distribution of Organic Carbon in Different Soil Fractions in Ecosystems of Central Amazonia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2015**, *39*, 232. [[CrossRef](#)]

30. Roscoe, R.; Machado, P. L. O. A.; Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica, 1a ed, Embrapa: Dourados, 2002.
31. Pinheiro, E. F. M.; Fracionamento Físico e Caracterização da Matéria Orgânica do Solo sob Diferentes Coberturas. **2007**, 113. [[Link](#)]
32. Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Sohi, S.; Thies, J. E.; Skjemstad, J. O.; Luizão, F. J.; Engelhard, M. H.; Neves, E. G.; Wirick, S.; Stability of biomass-derived black carbon in soils. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **2008**, 72, 6069. [[CrossRef](#)]
33. Christensen, B. T.; *Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates*. Springer, New York, 1992.
34. Conti, M. E.; Palma, R. M.; Arrigo, N.; Giardina, E.; Seasonal Variations of the Light Organic Fractions in Soils Under Different Agricultural Management Systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **1992**, 23, 1693. [[CrossRef](#)]
35. Freixo, A. A.; Machado, P. L. O. D. A.; dos Santos, H. P.; Silva, C. A.; Fadigas, F. D. S.; Soil organic carbon and fractions of a Rhoic Ferralsol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research* **2002**, 64, 221. [[CrossRef](#)]
36. Machado, P. L. O. A.; *Fracionamento físico do solo por densidade e granulometria para a quantificação de compartimentos da matéria orgânica do solo - um procedimento para a estimativa pormenorizada do seqüestro de carbono pelo solo*. Embrapa: Rio de Janeiro, 2002. [[Link](#)]
37. Liang, B.; Lehmann, J.; Sohi, S. P.; Thies, J. E.; O'Neill, B.; Trujillo, L.; Gaunt, J.; Solomon, D.; Grossman, J.; Neves, E. G.; Luizão, F. J.; Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry* **2010**, 41, 206. [[CrossRef](#)]
38. Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G.; *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 573 p. 2017.
39. Sohi, S. P.; Mahieu, N.; Arah, J. R. M.; Powlson, D. S.; Madari, B.; Gaunt, J. L.; A Procedure for Isolating Soil Organic Matter Fractions Suitable for Modeling. *Soil Science Society of America Journal* **2001**, 65, 1121. [[CrossRef](#)]
40. Rangel, O. J. P.; Silva, C. A.; Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de Latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2007**, 31, 1609. [[CrossRef](#)]
41. Freixo, A. A.; Machado, P. L. O. A.; Guimarães, C. M.; Silva, C. A.; Fadigas, F. S.; Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de latossolo do cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2002**, 26, 425. [[CrossRef](#)].
42. Leite, L. F. C.; Mendonça, E. S.; Neves, J. C. L.; Machado, P. L. O. A.; Galvão, J. C. C.; Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2003**, 27, 821. [[CrossRef](#)]
43. Moraes, M. C.; Lemos, V. P.; Moraes, D. S.; Lamarão, C. N.; Characterization and distribution of pyrogenic carbon in a fraction of archaeological black earth from Caxiuana. *Journal of the Brazilian Chemical Society* **2015**, 26, 1664. [[CrossRef](#)]
44. Batjes, N. H.; Dijkshoorn, J. A.; Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma* **1999**, 89, 273. [[CrossRef](#)]
45. Schellekens, J.; Almeida-Santos, T.; Macedo, R. S.; Buurman, P.; Kuyper, T. W.; Vidal-Torrado, P.; Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia — A pyrolysis-GC/MS study. *Geoderma* **2017**, 288, 154. [[CrossRef](#)]
46. Hobley, E.; Vertical Distribution of Soil Pyrogenic Matter: A Review. *Pedosphere* **2019**, 29, 137. [[CrossRef](#)]