

Artigo

Avaliação da Estabilidade de Agregados em Marcadores Ambientais Terrestres do Antropoceno Submetidos a Diferentes Períodos de Pousio

Soares, R.; Maddock, J. E. L.; Campos, D. V. B.; Madari, B. E.;

Machado, P. L. O. A.; Santelli, R. E.*

Rev. Virtual Quim., 2018, 10 (6), 1693-1718. Data de publicação na Web: 21 de janeiro de 2019

<http://rvq.sbq.org.br>

Evaluation of Aggregate Stability in Terrestrial Anthropocene Markers Submitted to Different Fallow Periods

Abstract: Archaeological soils known as Amazonian Dark Earth (ADE) were proposed to be eligible as golden spikes from the beginning of the Anthropocene 2000 years BP (before present). This hypothesis was highly contested by the international scientific community that pointed out as ADE do not have the necessary geological preservation conditions to serve as golden spikes. One of the main allegations is how ADE is found in natural ecosystems, which are susceptible to natural or anthropic erosion, which would prevent an adequate stratigraphic preservation. Therefore, the objective of this study was to evaluate the stability characteristics of ADE soil aggregates over different fallow periods and to determine if the ADE have a stratigraphic preservation capacity that makes them resistant to rain and mechanical erosion. It was observed that the fallow time did not significantly influence the stability of aggregates of the two evaluated areas and it was observed also that the organic matter of the soil (SOM) did not play a strong role as a cementing agent of the particles due to the oxidic and kaolinic character of these areas. Consequently, a susceptibility to rainfall and anthropic erosion of the ADE was verified, making them unusable as golden spikes from the beginning of the Anthropocene.

Keywords: Anthropocene golden spike; amazonian dark earth; black carbon; anthropic soils.

Resumo

Recentemente os solos arqueológicos Amazônicos conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) foram propostos para serem elegíveis como Golden spikes do início do Antropoceno há 2000 anos antes do presente. Contudo, esta hipótese foi altamente contestada pela comunidade científica internacional que apontou que as TPI não possuem as condições de preservação geológicas necessárias para servirem como Golden spikes. Uma das principais alegações é que as TPI encontram-se em ecossistemas naturais abertos suscetíveis à erosão natural ou antrópica, o que inviabilizaria uma adequada preservação estratigráfica. Logo, o objetivo deste estudo foi avaliar as características de estabilidade de agregados de solos de TPI sobre diferentes períodos de pousio e determinar se as TPI possuem capacidade de preservação estratigráfica que as tornem resistentes à erosão pluvial e mecânica. Foi constatado que o tempo de pousio não influenciou significativamente na melhoria da estabilidade de agregados das duas áreas avaliadas e foi observado que a matéria orgânica do solo (MOS) não desempenhou uma forte participação como agente cimentante das partículas devido ao caráter oxidico e caulínico destas áreas. Consequentemente, foi constatado a suscetibilidade à erosão pluvial e antrópica das TPI, inviabilizando-as como Golden Spikes do início do Antropoceno.

Palavras-chave: Golden spike do Antropoceno; terra preta de índio; carbono pirogênico; solos antrópicos.

* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Química Analítica, Av. Athos da Silveira Ramos 149, Centro de Tecnologia, Bloco A, CEP: 21941-909, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

✉ resantelli@globo.com

DOI: [10.21577/1984-6835.20180114](https://doi.org/10.21577/1984-6835.20180114)

Avaliação da Estabilidade de Agregados em Marcadores Ambientais Terrestres do Antropoceno Submetidos a Diferentes Períodos de Pousio

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

^a Instituto Estadual do Ambiente. Avenida Venezuela n° 110; CEP 20081-312, Saúde, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

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

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

^d Embrapa 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 Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Química Analítica, Av. Athos da Silveira Ramos 149, Centro de Tecnologia, Bloco A, CEP: 21941-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

* resantelli@globocom

Recebido em 16 de janeiro de 2019. Aceito para publicação em 16 de janeiro de 2019

1. Introdução

1.1. Processos erosivos e estabilidade de agregados do solo

2. Material e Métodos

2.1. Descrição das áreas de estudo

2.2. Coleta e tratamento das amostras

2.3. Fracionamento das classes de tamanho dos agregados dos solos das TPI

2.4. Determinação da distribuição de tamanhos dos agregados das TPI

2.5. Análise da composição elementar

2.6. Análise estatística dos resultados

3. Resultados e Discussão

3.1. Distribuição das classes de tamanhos dos agregados de TPI

3.2. Índices de agregação dos solos de TPI

3.3. Estoques de Carbono e Nitrogênio da soma das classes de tamanho de agregados de TPI

4. Conclusões

1. Introdução

A agricultura na Região Amazônica (Figura 1)¹ possui como desafio a adoção de práticas de manejo sustentáveis que sejam efetivas em evitar o empobrecimento da fertilidade dos solos, ocasionado pela retirada de nutrientes após sucessivas colheitas, assim como das degradações físicas e/ou químicas que podem ocorrer como consequência da erosão, lixiviação e compactação do solo.²⁻⁹ O manejo sustentável das terras amazônicas apresenta-se ainda mais desafiador, pois os solos predominantes desta região apresentam baixas concentrações de nutrientes; elevada acidez e saturação por alumínio; altas concentrações de óxidos e óxi-hidróxidos de

ferro e alumínio e baixa capacidade de troca catiônica (CTC).⁶⁻¹⁴ Consequentemente, a baixa fertilidade destes solos torna-se um fator limitante para o potencial de produção agrícola, assim como para a sustentabilidade ambiental e econômica local.²⁻¹¹ Contudo, nesta mesma região são encontrados solos altamente férteis com horizontes A antrópicos de coloração escura, conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI), possuindo elevados teores de Ca, Mg, Mn, Zn, P e matéria orgânica estável.⁶⁻²⁶ Aparentemente, nas TPI existem microecossistemas próprios que retêm e disponibilizam macro e microelementos por um período de tempo maior que os solos adjacentes ou típicos da Amazônia, sem horizonte A antrópico, mesmo sob clima tropical úmido e sob intenso uso agrícola.⁷⁻²⁹



Figura 1. Visão geral da Região Amazônica. Adaptado e modificado de National Geographic – Amazonian under Threat¹

Embora tradicionalmente conhecidas e estudadas pela comunidade científica internacional, as TPI obtiveram um novo destaque quando foram propostas em 2011

como possíveis marcadores do início do Antropoceno (*golden spikes*) pelos cientistas do solo Giacomo Certini e Riccardo Scalenghe.³⁰ Certini e Scalenghe elaboraram a

polêmica hipótese que o Antropoceno teria tido seu início há cerca de 2000 anos BP (2000 anos *before present* – antes do presente) quando o estado natural de grande parte da superfície terrestre do planeta foi significativamente alterado pela ação das emergentes civilizações humanas altamente organizadas.³⁰⁻³³ A proposta apresenta algumas vantagens, como a de estar situada cronologicamente após o evento geológico global que deu origem à recém reconhecida Idade *Meghalayan* em 4,2 ka BP (4200 anos *before present* – antes do presente),^{34,35} como pode ser observado na Figura 2. Contudo, esta

hipótese foi extremamente contestada tanto nacional³⁷ quanto internacionalmente,³⁷⁻³⁹ sendo que uma das principais críticas foi que as TPI não possuem a capacidade de preservação estratigráfica adequada por estarem em um sistema natural aberto extremamente suscetível à erosão dos solos. Esta elevada erosão é proporcionada pelas altas temperaturas e elevados índices pluviométricos da Região Amazônica, assim como pela acentuada utilização agrícola comercial ou de subsistência por parte da população nativa da região (caboclos).^{32,37-39}

Éon	Era	Período	Época	Idade	Idade (Ma)
Fanerozoico	Cenozoico	Quaternário	Antropoceno	A definir	?
			Holocênico	Meghalayan	0,0042
				Northgrippian	0,0082
				Greenlandian	0,0117

Figura 2. Sugestão do Grupo de Trabalho do Antropoceno (*Anthropocene Working Group*, AWG) para inclusão do Antropoceno como Época geológica. Adaptado de Silva *et al.*, e Zalasiewicz e colaboradores^{34,36,37}

1.1. Processos erosivos e estabilidade de agregados do solo

A erosão do solo, especialmente a erosão causada pela água, facilita a translocação de materiais, assim como afeta a dinâmica dos nutrientes e da matéria orgânica do solo (MOS).⁴⁰ Também, a mudança do uso da terra de solos sob florestas para solos agricultáveis é uma das principais responsáveis pela degradação estrutural e aumento dos processos erosivos de vastas extensões de terra da Região Amazônica,⁴⁰⁻⁴³ pois o uso contínuo de aração e gradagem proporciona a ruptura da estrutura do solo e incrementa a taxa de decomposição da MOS devido à exposição desta, que estava encapsulada

dentro de agregados do solo, à oxidação microbiana.⁴³ Todavia, o reflorestamento das áreas agricultáveis ou significativos períodos de pousio podem proporcionar um método efetivo para a proteção dos solos da erosão e da degradação, assim como uma possível regeneração das propriedades estruturais.⁴⁴⁻⁴⁶

Um agregado é um conjunto de partículas primárias (argila, silte e areia) do solo que se aderem umas às outras mais fortemente do que as outras partículas circunvizinhas comportando-se mecanicamente como unidade estrutural (Figura 3). Se formado naturalmente é denominado *ped*, mas se formado artificialmente por atividade humana como a aração, gradagem ou escavação é denominado torrão.⁴⁷ O solo é composto por um conjunto de agregados de diferentes

tamanhos e estabilidades (Figura 3). Deve-se frisar que o estado de agregação do solo tem influência sobre a infiltração de água, a biodiversidade, a dinâmica da biomassa do solo, a disponibilidade de oxigênio às raízes e a erosão do solo.⁴⁷⁻⁵⁰

A distribuição das classes ou tamanhos de agregados é considerada um fator importante para a germinação de sementes e para o desenvolvimento das raízes, servindo como indicador da qualidade do solo.⁴⁴⁻⁵³ A estabilidade de agregados é um fator relevante no controle da erosão hídrica em solos tropicais ácidos, pois a erodibilidade dos solos é diretamente relacionada à estabilidade de agregados em água. Além disso, a prolongada existência de poros maiores no solo, que favorecem altas taxas de infiltração e aeração, depende da estabilidade dos agregados. A agregação do solo é também um dos principais processos responsáveis pelo acúmulo e o sequestro de carbono (C) e nitrogênio (N) em solos. Conseqüentemente, a degradação estrutural do solo resulta em perda de MOS e de nitrogênio.⁴⁷⁻⁵⁰ Também, a agregação de solos tropicais ácidos é influenciada pela capacidade de floculação e a natureza dos cátions presentes; a química do alumínio, em função da faixa de pH do solo; a mineralogia do solo; os tipos de ácidos orgânicos presentes; a formação de interação ou ligação entre partículas de argila, os cátions polivalentes e a MOS; a atividade microbiana e os tipos de microrganismos envolvidos.⁴⁷⁻⁵⁰

Os processos de agregação do solo podem ser explicados pela Teoria da Organização Hierárquica de diferentes estágios de agregação.^{43,51-53} Esses processos estão relacionados à persistência temporal de agentes ligantes (transientes, temporários ou persistentes) com acentuada formação de microagregados (agentes ligantes persistentes, partículas primárias de óxidos de ferro e alumínio) ou macroagregados estáveis resultantes do efeito de emaranhamento de hifas fúngicas e raízes que são agentes ligantes temporários. Geralmente, entretanto, a agregação em solos altamente intemperizados das regiões tropicais e subtropicais é menos afetada pela MOS que em

solos de região temperada e mais pelos óxidos de alumínio e ferro, assim como os argilominerais 1:1 que são os agentes ligantes predominantes em solos oxidícos.^{43,51-53} Então, a estabilização da MOS aumenta com o acréscimo da concentração de argila e sesquióxidos por causa de maior área superficial reativa e a proteção física da MOS dentro dos microagregados.

Foi elaborada a hipótese que solos de TPI com longos períodos de pousio apresentam a capacidade de potencializar uma melhoria na estabilidade de agregados estáveis em água, o que os tornariam elegíveis como marcadores ambientais (*golden spikes*) do início do Antropoceno. O objetivo deste estudo foi (1) Avaliar as características de estabilidade de agregados de solos de Terra Preta de Índio sobre diferentes períodos de pousio e (2) determinar se as TPI possuem capacidade de preservação estratigráfica que as tornem resistentes à erosão pluvial e mecânica proporcionada por longos períodos de cultivo agrícola e uso intensivo do fogo pelos habitantes pré-Colombianos.

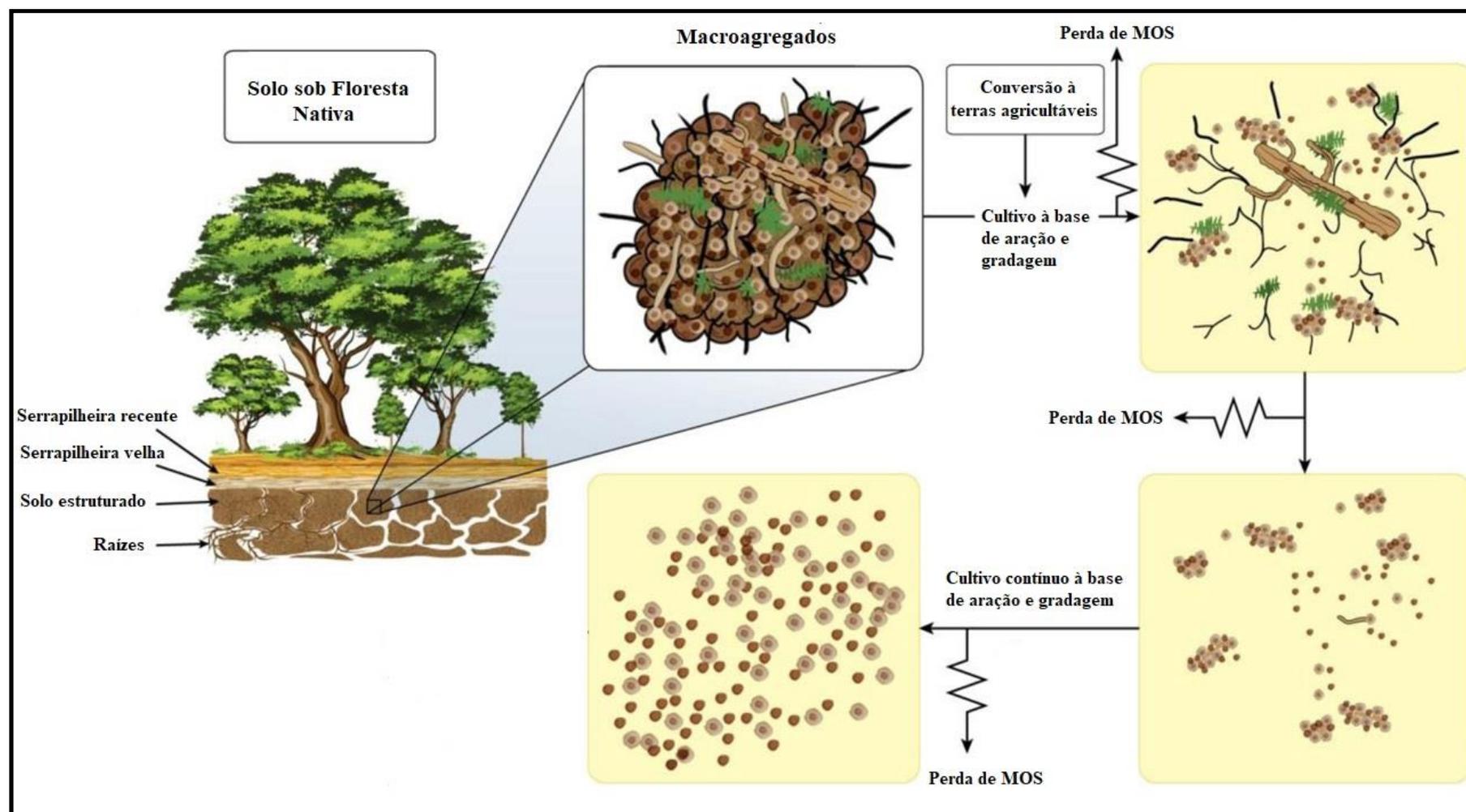


Figura 3. Diagrama esquemático adaptado do modelo conceitual elaborado por Tivet e colaboradores que ilustra o efeito da conversão do uso da terra na agregação do solo e na dinâmica da MOS.⁴³ A conversão da vegetação nativa para o preparo agrícola baseado em arado e gradagem rompe os agregados do solo, promove a dispersão das partículas de argila e microagregados (silte + argila) e diminui a formação de novos agregados

2. Material e Métodos

2.1. Descrição das áreas de estudo

As áreas de TPI (P01 e P02) avaliadas neste estudo estão localizadas no município de Rio Preto da Eva, estado do Amazonas, Brasil (Tabela 1 e Figura 4) e foram minuciosamente descritas em suas características pedológicas por Soares e colaboradores.³⁷ De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SiBCS) elaborado pela Embrapa,³⁷ estas áreas foram classificadas como Argissolos Amarelos distróficos típicos com texturas

arenosas/médias e horizonte A antrópicos, situadas sob florestas secundárias, cujas idades contabilizam entre 10 e 20 anos de pousio, respectivamente.³⁷ Além disso, estão inseridas no domínio climático do tipo 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 %.³⁷ 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.³⁷

Tabela 1. Localização georreferenciada das áreas avaliadas neste estudo.

Perfil	Município	Coordenadas	
P01	Rio Preto da Eva	S 2°40'51,8"	W 59°43'15,7"
P02	Rio Preto da Eva	S 2°40'52,37"	W 59°43'16,48"

Os solos encontrados no município de Rio Preto da Eva são desenvolvidos a partir de arenitos e siltitos da Formação Alter do Chão; predominando no relevo a presença de platôs, nas partes mais elevadas, combinado com áreas rebaixadas de sopé.³⁷

solo e coletando-se em sacos plásticos o que passou, agitando-se levemente a peneira para ajudar na desagregação dos torrões maiores. As amostras foram secas ao ar na sombra por 24 horas ou até atingirem um limite de 10 a 15 % de umidade.⁴⁸⁻⁵⁰

2.2. Coleta e tratamento das amostras

Amostras de solos das duas áreas de TPI foram coletadas em 2005, delimitando-se uma área de um hectare e cavando-se quatro mini-trincheiras com 50 cm de profundidade, pois estas deveriam ser mais profundas que a última camada a ser amostrada, sendo no presente estudo a camada 20-40 cm. Posteriormente, coletaram-se amostras em quatro camadas (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm) com uma colher de pedreiro de forma representativa para a profundidade inteira, sob a forma de blocos. Cada amostra de solo passou diretamente por uma peneira de 19 mm, no local da amostragem, quebrando-se o

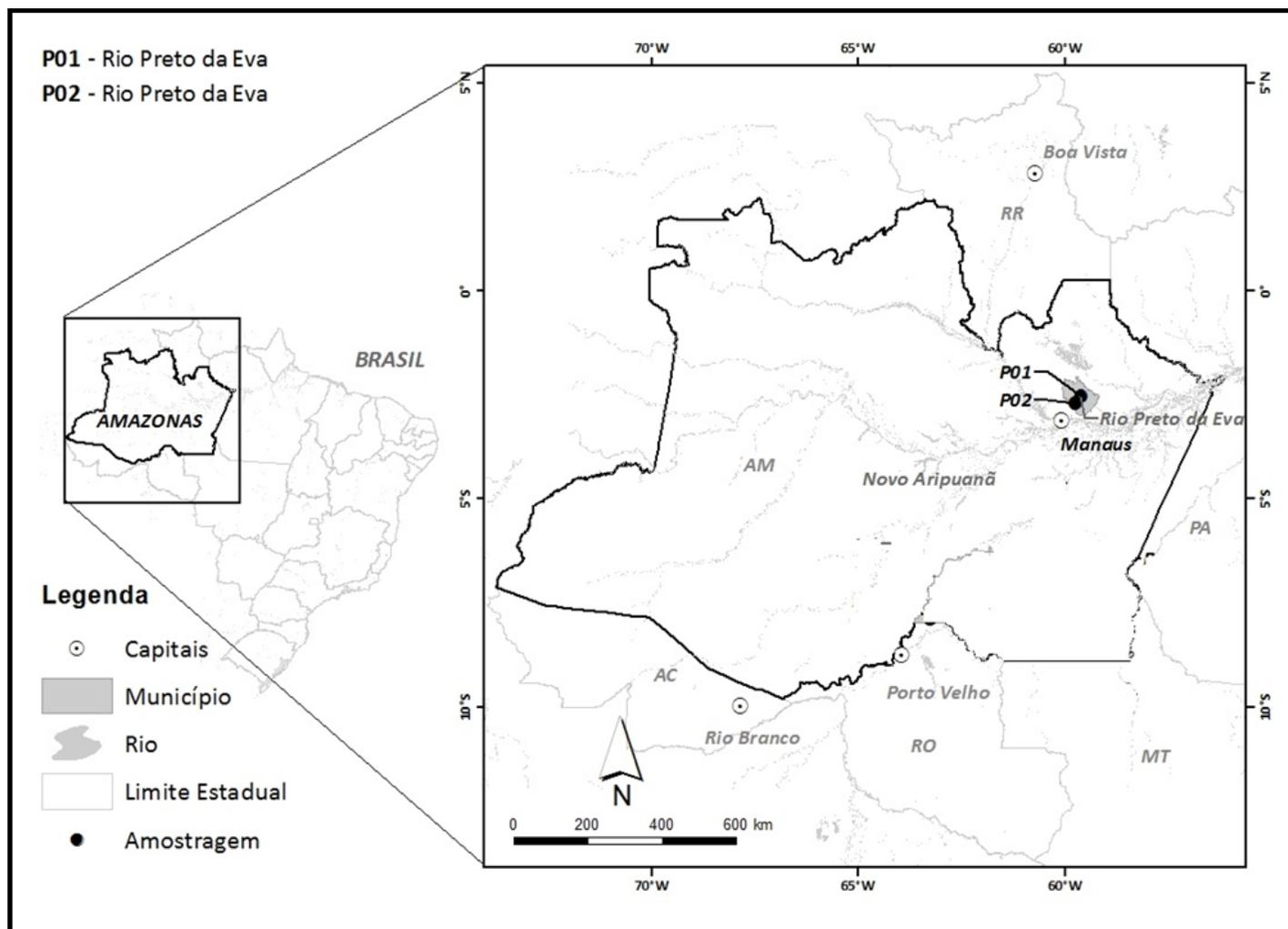


Figura 4. Localização georreferenciada das TPI sob florestas secundárias em pouso

2.3. Fracionamento das classes de tamanho dos agregados dos solos das TPI

O Fracionamento dos Agregados das TPI foi realizado no Laboratório de Análise de Água, Solo e Planta (LASP) da Embrapa Solos usando-se o método descrito por Madari.⁴⁸⁻⁴⁹ Escolheu-se a profundidade limite de 20-40 cm, por ser esta, em média, a profundidade mais conhecida para a existência de Horizonte A antrópico nestes solos arqueológicos.⁶⁻¹³

Alíquotas de solo, em triplicata, de cada camada foram separadas em oito frações de tamanho de agregado por peneiração úmida, utilizando um tamizador mecânico equipado com oito peneiras (19-7,98; 7,98-4,0; 4,0-2,0; 2,0-1,0; 1,0-0,5; 0,5-0,25; 0,25-0,125 e 0,125-0,053 mm).

O método elaborado por Madari será descrito sucintamente a seguir:^{48,49} Pesaram-se oito béqueres de 100 mL em balança analítica (precisão: 0,01g). Encheram-se os cilindros do aparelho tamizador de oscilação vertical. Colocaram-se papéis de filtro na primeira peneira (8 mm). Ajustou-se o nível da água ou a altura da série de peneiras para que o papel de filtro entrasse em contato com a superfície da água. Pesou-se e colocou-se

30,00 g de solo em cima do papel de filtro durante cinco minutos para que o mesmo pudesse absorver a água pela força de capilaridade e em seguida retirou-se cuidadosamente o papel de filtro com a ajuda de uma pinça. Executou-se a tamisação durante 15 minutos; a oscilação vertical do aparelho foi de 35 mm e o número de repetição de uma fase foi 30 por minutos (30 rpm). Retirou-se, cuidadosamente, a série de peneiras da água e levou-se a uma pia com água corrente. Transferiram-se, com a ajuda de lenta corrente d'água, os agregados de cada uma das peneiras para um béquer separadamente para cada classe de agregados. Colocaram-se os béqueres com os agregados numa estufa com ar forçado para secar a 105 °C; a secagem continuou até atingir peso constante. Transferiram-se os béqueres com os agregados para dessecadores sob vácuo e os deixou resfriar à temperatura ambiente (25 °C). Pesaram-se os béqueres com os agregados em balança analítica e transferiu-se os agregados para frascos de polietileno à temperatura ambiente para a análise de carbono e nitrogênio.

A distribuição por Classe de Tamanhos de Agregados (CTA) das TPI foi expressa (g kg⁻¹) usando a equação 1:

$$CTA = \frac{W_i}{W} * 1000 \quad \text{Equação (1)}$$

Onde,

w_i = massa de cada classe de agregados i em relação ao total;

w = massa total de todas as frações de tamanho dos agregados.

2.4. Determinação da distribuição de tamanhos dos agregados das TPI

O estado de agregação do solo é expresso, tradicionalmente, por índices de agregação que caracterizam a distribuição dos diferentes tamanhos de agregados que compõem o solo:

O Diâmetro Médio Ponderado (DMP) é uma estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados e é expresso em milímetros. Este índice é diretamente proporcional à porcentagem dos maiores agregados. É calculado pela equação 2:

$$DMP = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad \text{Equação (2)}$$

Onde,

w_i = proporção de cada classe de agregados em relação ao total;

x_i = diâmetro médio de cada classe de agregados (mm).

Uma vez conhecido os DMP de cada área e cada profundidade compararam-se os resultados com a classificação de estabilidade de agregados elaborada por Le Bissonais,⁴⁴ conforme exposta na Tabela 2.

Tabela 2. Classes de estabilidade de agregados dos solos baseadas nos valores de DMP.

Classe	DMP (mm)	Estabilidade
1	< 0,4	Muito Instável
2	0,4 – 0,8	Instável
3	0,8 – 1,3	Médio
4	1,3 – 2,0	Estável
5	> 2,0	Muito Estável

O Diâmetro Médio Geométrico (DMG) mostra o tamanho mais freqüente dos

agregados. Também é expresso em milímetros. É calculado pela equação 3:

$$DMG = \exp\left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \log X_i}{\sum_{i=1}^n W_i}\right] \quad \text{Equação (3)}$$

Onde,

W_i = peso de agregados (g) dentro de uma classe de agregados de diâmetro médio X_i .

O Índice de Estabilidade de Agregados (IEA) é uma medida da agregação do solo, e varia entre 0 e 100 %. É calculado pela equação 4:

$$IEA(\%) = 100 * \frac{\text{Peso da amostra seca} - w_{p25} - \text{areia}}{\text{Peso da amostra seca} - \text{areia}} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde,

W_{p25} = peso dos agregados (g) < 0,25 mm.

Areia = peso de partículas (g) de diâmetro entre 2,0 – 0,053 mm.

Analyzer, Perkin-Elmer). Utilizando-se aproximadamente $2,0 \pm 1,0$ mg de amostras de solo finamente moído (solo macerado em almofariz até a granulometria de talco) pesadas em microbalança acoplada ao aparelho. 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.

2.5. Análise da composição elementar

A composição elementar (concentrações de carbono e nitrogênio) das classes de tamanho de agregados de TPI foi determinada em um analisador elementar automático da Perkin Elmer Life and Analytical Sciences, Inc. Boston, MA, EUA (PE 2400 series II CHNS/O

Os valores de carbono, hidrogênio e nitrogênio foram corrigidos para base seca, sendo realizada a quantificação do teor de

umidade, porém não foi executada a quantificação do teor de cinzas nas amostras. O Coeficiente de Variação apresentado pela

técnica foi de 3 %. A partir dos teores de C, H e N, foram calculadas as razões atômicas H/C e C/N segundo as equações:

$$H/C = [(\%H/1)/(\%C/12)] \text{ e } C/N = [(\%C/12)/(\%N/14)]$$

Também, determinaram-se as relações C/N e os índices de estratificação (IE), dividindo-se as concentrações de carbono e nitrogênio da camada de solo 0-5 cm pela camada 5-10 cm como descrito em Chagas e colaboradores.^{7,54}

2.6. Análise estatística dos resultados

O delineamento amostral foi inteiramente casualizado, com esquema fatorial 2x4x3 (2 solos, 4 trincheiras e 3 réplicas de laboratório). Para verificar a existência de 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. As análises estatísticas foram realizadas pelo uso do *software* Statistica 7.0® (Statsoft Inc.; 2004).

3. Resultados e Discussão

3.1. Distribuição das classes de tamanhos dos agregados de TPI

A distribuição das classes de tamanho de agregados mostrou que ambas as áreas (P01 e P02) apresentaram, em todas as profundidades avaliadas, aproximadamente 90 % da massa total do solo incorporada em agregados, sendo cerca de 70 a 80 % distribuídos nas classes de tamanhos maiores, indicando forte potencial de macroagregação (Tabela 3). Também, a quantidade de solo em macroagregados diminui suavemente com a profundidade; decrescendo da camada 0-5 à camada 20-40 cm, aproximadamente 4,5 % para o solo da área P01 e 9 % para a área P02, respectivamente.

A maior concentração de agregados estáveis em água para a área P01 ocorreu na classe de agregado de 0,25 mm em todas as profundidades. Contudo, para a área P02 nas duas camadas mais superficiais (0-5 e 5-10 cm) a classe de agregado predominante foi a de 0,5 mm, e nas duas camadas mais profundas (10-20 e 20-40 cm) a 0,25 mm, assim como observado para a área P01, indicando para ambas as áreas um pequeno crescimento radicular e baixa atividade de hifas fúngicas.^{50,51} Além disso, supõe-se que o intenso e prolongado uso agrícola do solo nas duas áreas destruiu os agregados maiores que 1,0 mm de diâmetro em classes menores, e que o relativamente curto tempo de pousio (10 e 20 anos) não foi suficiente para promover um aumento substancial nos maiores macroagregados,^{45,46} embora seja observado um pequeno acréscimo ($p < 0,05$) nos maiores agregados nas duas camadas mais superficiais da área P02.

O acúmulo de agregados nas classes de diâmetro inferiores a 1,0 mm em áreas intensamente cultivadas ocorre porque esses agregados são estáveis ao rápido umedecimento e não são destruídos por práticas agrícolas convencionais, devido a serem constituídos, predominantemente, de partículas de 2-20 μm de diâmetro, unidos em cadeia por vários agentes cimentantes, como polissacarídeos derivados de plantas.^{50,51}

Tabela 3. Distribuição de Agregados em Classes de Tamanhos em TPI (valores em g kg^{-1} Solo), Rio Preto da Eva, Brasil.

Área	Classes de Tamanhos de Agregados (mm)								Macroagregados	Microagregados
	19 – 7.98	7.98 – 4.0	4.0 – 2.0	2.0 – 1.0	1.0 – 0.5	0.5 – 0.25	0.25 – 0.125	0.125 – 0.053	19.0 - 0.25	0.25 - 0.053
----- 0 - 5 cm -----										
P01	5 ± 6 a	39 ± 10 a	54 ± 14 a	42 ± 5 a	283 ± 13 a	366 ± 37 a	129 ± 29 a	32 ± 13 a	790 ± 12 a	161 ± 35 a
P02	87 ± 65 b	67 ± 17 b	78 ± 17 b	74 ± 16 b	270 ± 61 a	210 ± 60 b	105 ± 44 a	30 ± 18 a	786 ± 48 a	136 ± 61 a
----- 5 - 10 cm -----										
P01	46 ± 39 a	88 ± 55 a	90 ± 26 a	62 ± 14 a	199 ± 56 a	241 ± 25 a	145 ± 27 a	52 ± 8 a	726 ± 36 a	198 ± 34 a
P02	92 ± 73 a	58 ± 28 a	80 ± 31 a	75 ± 11 a	238 ± 66 a	214 ± 42 a	127 ± 31 a	41 ± 13 a	756 ± 56 a	167 ± 41 a
----- 10 - 20 cm -----										
P01	20 ± 21 a	53 ± 11 a	56 ± 21 a	75 ± 44 a	245 ± 48 a	265 ± 25 a	147 ± 10 a	37 ± 11 a	713 ± 57 a	184 ± 17 a
P02	64 ± 57 a	55 ± 22 a	94 ± 21 a	99 ± 19 a	206 ± 32 a	225 ± 38 b	131 ± 24 a	45 ± 15 a	745 ± 23 a	175 ± 33 a
----- 20 - 40 cm -----										
P01	47 ± 76 a	22 ± 16 a	32 ± 16 a	81 ± 41 a	282 ± 49 a	281 ± 46 a	137 ± 54 a	42 ± 18 a	745 ± 71 a	179 ± 72 a
P02	17 ± 21 a	39 ± 14 b	84 ± 24 b	86 ± 9 a	229 ± 46 b	242 ± 49 a	145 ± 38 a	53 ± 21 a	697 ± 54 a	198 ± 58 a

Valores acompanhados dos respectivos desvios-padrão (n = 12). Comparações entre as médias feita pelo teste Tukey (HSD).

Valores seguidos pela mesma letra numa mesma coluna não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variâncias ($p \leq 0,05$).

3.2. Índices de Agregação dos Solos TPI

Os solos das duas diferentes áreas de TPI apresentaram baixas propriedades de agregação, em todas as profundidades avaliadas, como pode ser visto pelos diferentes índices de agregação do solo (Tabela 4). Percebe-se que a área P02 foi a que apresentou a maior estabilidade de agregados em todas as profundidades ($p < 0,05$), sendo essa estabilidade decrescente com a profundidade, levando a crer que um tempo maior de pousio favoreceu a uma maior formação e estabilização de agregados que em P01 ou que a área P02 foi menos intensamente cultivada com culturas agrícolas pelos habitantes contemporâneos da localidade.

Os valores de Diâmetro Médio Ponderado (DMP) variaram entre 0,9 e 1,8 mm em P01 e 2,2 a 1,1 mm em P02, respectivamente (Tabela 4). Também, na área P01 houve um acréscimo de 100 %, e com diferença estatística significativa ($p < 0,05$) no valor médio de DMP da camada mais superficial (0-5 cm) para as camadas adjacentes (5-10, 10-20 e 20-40 cm) que permaneceram iguais e estatisticamente semelhantes entre si ($p < 0,05$). Por outro lado, na área P02 praticamente não se observou variação no valor médio do DMP entre as três primeiras camadas (0-5, 5-10 e 10-20 cm); contudo, ao se passar para a quarta camada, observou-se que o DMP caiu à metade; não foram encontradas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) entre as camadas da área P02. Embora as duas áreas P01 e P02 possuam composição granulométrica semelhante,³⁷ foi constatado um comportamento inverso entre as mesmas, no que tange ao tamanho do DMP; na área P01 houve aumento em função da profundidade e na área P02 diminuição (Tabela 4).

Na camada de 0-5 cm do solo, a área P01 apresentou um valor médio de DMP 60 %

menor em relação ao valor apresentado por P02, embora não tenham sido estatisticamente diferentes ($p < 0,05$); nas camadas 5-10 e 10-20 cm não foram notadas diferenças significativas entre as áreas P01 e P02, estando os valores de DMP muito próximos a 2 mm; na camada de solo de 20-40 cm a área P01 apresentou um valor de DMP cerca de 60 % maior ao que foi apresentado pela área P02, sendo estatisticamente diferentes ($p < 0,05$). O DMP é uma estimativa da quantidade relativa de solo em cada classe de agregados e aumenta conforme se aumenta a porcentagem dos maiores agregados; deduz-se que os macroagregados são mais abundantes nas camadas mais superficiais da área P02 do que na área P01, ocorrendo o inverso quando se vai para as camadas menos superficiais, corroborando os resultados anteriormente descritos na Tabela 3.

Ao se utilizar a classificação de estabilidade de agregados proposta por Le Bissonais,⁴⁴ observou-se que a área P01 apresenta como instável a camada mais superficial do solo (0-5 cm) e as demais como estáveis. Por outro lado, a área P02 apresenta-se muito estável nas camadas mais superficiais (0-5 e 5-10 cm) decrescendo para estável (10-20 cm) à medianamente estável na camada mais profunda (Figura 5). A maior estabilidade de agregados de P02, segundo a classificação de Le Bissonais, pode ser devido ao maior tempo de pousio, o que proporcionaria um maior adensamento da cobertura vegetal, com isso impedindo a ação erosiva das chuvas sobre os agregados do solo. Além disso, embora estas áreas estejam preservadas por longos períodos de pousio, o intenso uso agrícola pretérito associado com as condições pluviométricas extremas da Região Amazônica (> 2.000 mm) indicam que são áreas propensas à erosão sob fortes chuvas e que possuem baixa resistência mecânica do solo às ações antrópicas, como cultivo com aração e gradagem.

Tabela 4. Índices de agregação dos solos TPI, Rio Preto da Eva, Brasil.

Área	DMG (mm)	DMP (mm)	> 2 mm (%)	IEA (%)
----- 0 - 5 cm -----				
P01	0,88 ± 0,02 aA	0,9 ± 0,1 aA	10 ± 3 aA	-16 ± 45 aA
P02	1,02 ± 0,05 aA	2,2 ± 1,0 aA	23 ± 9 bA	46 ± 37 bA
----- 5 - 10 cm -----				
P01	0,95 ± 0,03 aA	1,8 ± 0,3 aB	22 ± 7 aB	46 ± 46 aA
P02	0,97 ± 0,06 aA	2,2 ± 0,8 aA	23 ± 12 aA	46 ± 30 aA
----- 10 - 20 cm -----				
P01	0,91 ± 0,01 aA	1,8 ± 0,3 aB	13 ± 3 aA	45 ± 21 aA
P02	0,96 ± 0,05 aA	1,9 ± 0,8 aA	21 ± 7 bA	46 ± 33 aA
----- 20 - 40 cm -----				
P01	0,91 ± 0,01 aA	1,8 ± 0,3 aB	10 ± 10 aA	46 ± 97 aA
P02	0,91 ± 0,03 aA	1,1 ± 0,3 bA	14 ± 5 aA	45 ± 44 aA

Valores acompanhados dos respectivos desvios-padrão (n = 12). Comparações entre as médias feita pelo teste Tukey (HSD).

Valores seguidos pela mesma letra minúscula numa mesma coluna e pela mesma letra maiúscula numa mesma linha não são significativamente diferentes pelo Teste F da análise de variâncias ($p \leq 0.05$). DMG: Diâmetro Médio Geométrico; DMP: Diâmetro Médio Ponderado; IEA: Índice de Estabilidade de Agregados.

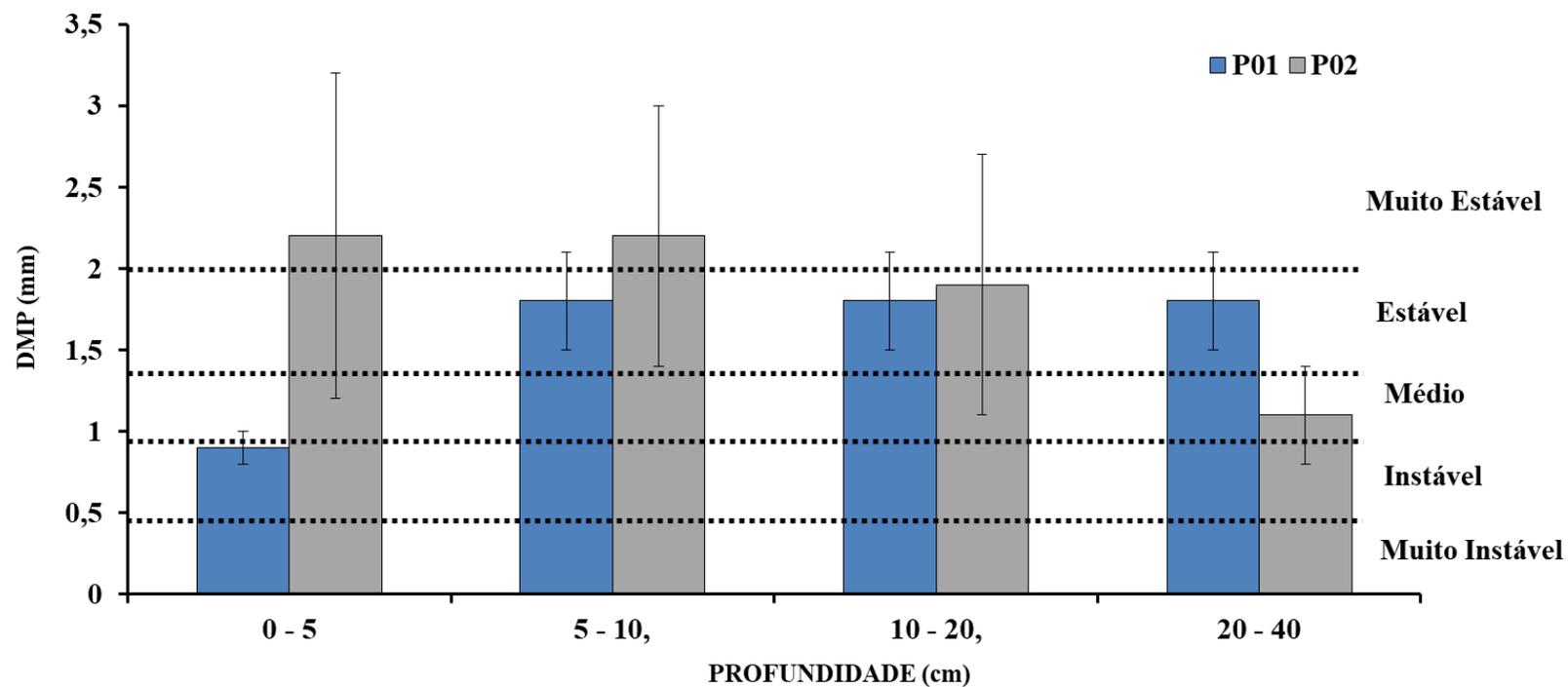


Figura 5. Classificação da estabilidade de agregados baseada nos valores de DMP.

Nas duas áreas os valores de Diâmetro Médio Geométrico (DMG) variaram entre 0,88 e 0,95 mm em P01 e 0,91 a 1,02 mm em P02, respectivamente (Tabela 4). Tanto na área P01 quanto na área P02, praticamente não ocorreu variação no valor do DMG entre as camadas, estando todas com valores muito próximos a 1,0 mm, e não sendo estatisticamente diferentes ($p \leq 0,05$). Ao contrário da tendência apresentada para o DMP, os valores obtidos para o DMG, indicam um padrão constante e inalterável em que o tamanho mais frequente dos agregados é próximo de 1,0 mm, contrariando o anteriormente discutido para os resultados do Tabela 4.

Nas duas áreas de TPI, os valores médios de agregados maiores que 2,0 mm (Agregados > 2 mm (%)), variaram entre 10 e 22 % para P01 e 14 e 23 % para P02 (Tabela 4). Na área P01 excetuando-se a segunda camada (5-10 cm) cujo valor de Agregados > 2 mm (%) é quase o dobro do encontrado para as demais, tem-se um comportamento constante e valores próximos a 10 %. Na área P02, com exceção da última camada (20-40 cm), tem-se um padrão de valores próximos a 20 %, não sendo encontrada diferença estatística ($p < 0,05$).

Excetuando-se o valor de IEA (%) da primeira camada de solo da área P01, que foi aproximadamente 50 % menor, e estatisticamente diferente ($p < 0,05$), da mesma camada da área P02, praticamente não ocorreram variações significativas, e nem diferenças estatísticas marcantes ($p < 0,05$) entre os valores encontrados nas camadas de TPI das áreas P01 e P02. Nas duas diferentes áreas os valores do Índice de Estabilidade de Agregados, IEA (%), variaram entre -16 a 46 % para P01 e 45 a 46 % para P02, respectivamente (Tabela 4). Na área P01 houve uma variação positiva de quase 50 % no valor médio do IEA (%) da camada mais superficial (0-5 cm) até as três camadas posteriores (5-10, 10-20 e 20-40 cm), permanecendo constantes os valores médios do IEA (%) entre todas as camadas da área P01, e estatisticamente não diferentes ($p <$

0,05). Na área P02 os valores médios do IEA (%) ficaram praticamente constantes em 46 %.

Foi observada uma mesma tendência entre o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e os valores médios de agregados maiores que 2,0 mm (%); ambos decresceram na área P02 e ascenderam na área P01. A mesma tendência entre o Índice de Estabilidade de Agregados (%) e o Diâmetro Médio Geométrico foi observada, pois ambos foram praticamente constantes entre as diferentes profundidades e áreas.

Ao contrário deste estudo, Silva e colaboradores ao avaliarem solos de TPI em uma floresta secundária preservada há mais de 25 anos em Novo Aripuanã (AM) identificaram elevados valores de DMG, DMP e agregados maiores que 2,0 mm, principalmente na camada mais superficial (0-5 cm) do solo e alegaram que seria devido à pedogênese das TPI fortemente influenciada por fatores antrópicos, que ao concentrarem grande quantidade de MOS sob a forma de carbono pirogênico deixariam estes solos mais soltos e com predomínio da formação de microagregados.⁵⁵ O mesmo foi observado por Pantoja *et al.*, e Cunha e colegas,^{56,57} ao avaliarem o estado de agregação de solos de TPI sob floresta nativa, cultivo de feijão guandu (*Cajanus cajan*) e brachiaria (*Brachiaria brizanta*) também em Novo Aripuanã (AM) e por Soares et al.,⁵⁸ ao avaliarem a estabilidade de agregados em solos de TPI sob pastagem de brachiaria (*Brachiaria brizanta*) em Manicoré (AM).

Por outro lado, ao se compararem os resultados obtidos neste estudo com outros da literatura observa-se que os valores apresentados de DMG são próximos ou superiores aos encontrados para TPI sob diferentes usos do solo,⁵⁹ porém os valores de Agregados > 2 mm (%), são quase três a seis vezes menores que aqueles observados para solos de TPI sob capoeira de 20 anos (Tabela 5), situando-se muito próximos dos encontrados para um solo de TPI sob cultivo atual e intenso de 30 anos.⁵⁹ Comparando-se com outros tipos de solos amazônicos os valores apresentados de DMG mostram-se

inferiores ao encontrado para um Latossolo Amarelo com capoeira de 20 anos e superiores a um Gleissolo sob várzea e um Cambissolo sob clareira (Tabela 5). Os solos sob TPI apresentam maiores propriedades de agregação (DMG e > 2 mm (%)) do que o Cambissolo, provavelmente devido às amostras deste terem sido coletadas em clareiras, nas quais o horizonte A foi “decapitado” anteriormente, ficando exposto

o horizonte B que apresenta estrutura maciça, poucos poros e reduzida MOS (Tabela 5). Em relação ao Gleissolo, observam-se menores valores de DMG do que os das TPI, isto é, possuem baixa estabilidade de agregados, por serem solos aluviais, formados por deposição de sedimentos siltosos inundados periodicamente, não existindo tempo suficiente para a formação de agregados estáveis (Tabela 5).

Tabela 5. Índices de Estabilidade de Agregados em Argissolo Vermelho-Amarelo com A antrópico (TPI) e alguns solos amazônicos típicos (adaptado de Martins e colaboradores)⁵⁹

Solo	Manejo	DMG (mm)	Agregados > 2 mm(%)
TPI	Capoeira (20 anos)	1,3 ± 0,40	59,9 ± 9,1
TPI	Cultivo Intenso (30 anos)	0,5 ± 0,14	15,1 ± 10,5
Latossolo Amarelo	Capoeira (20 anos)	4,05 ± 0,15	89,7 ± 8,0
Gleissolo	Várzea	0,21 ± 0,1	5,2 ± 1,3
Cambissolo	Clareira	0,25 ± 0,1	2,7 ± 0,7

*Profundidade da Amostra (0-20 cm).

O reduzido tamanho dos agregados nas TPI pode ser uma consequência do uso intensivo do fogo, de forma intencional ou não, como uma prática de manejo do solo pelas populações pré-Colombianas. A utilização do fogo nestas áreas de TPI foi evidenciada pela elevada presença de carvão vegetal e *black carbon* (carbono de origem pirogênica) por Soares e colaboradores.³⁷ Ademais, o fogo pode ser também um dos motivos que levam as TPI a mostrar tipicamente uma textura mais arenosa nos horizontes superficiais do que em solos adjacentes, o que está de acordo com a composição granulométrica dos solos TPI apresentadas para esta localidade.³⁷ O efeito do fogo no aumento das frações areia também foi evidenciado em diversos outros estudos em regiões florestais ao redor do mundo.⁶⁰⁻⁶³ Além disso, não se pode descartar a hipótese que o aumento da fração arenosa possa ser fruto do transporte das frações finas (translocação de argilas), devido ao maior impacto da chuva sobre o solo desnudado pela ação do fogo, com isso potencializando a erosão pluvial destes solos e inviabilizando-os

como opções adequadas a serem elegíveis como *golden spikes* do início do Antropoceno.

Madari e colegas ao estudarem a estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Eutroférico sob floresta em Londrina (PR);⁴⁸ assim como Wendling e colaboradores,⁶² examinando a agregação de um Latossolo Vermelho sob floresta Caducifólia em Viçosa (MG) e Peixoto *et al.*,⁴⁹ ao avaliarem o estado de agregação de um Latossolo Vermelho Distrófico sob Cerrado em Santo Antonio de Goiás (GO) encontraram altos valores para os índices de estabilidade de agregados. A única correlação aceitável entre os resultados de agregação apresentados neste estudo e os apresentados para solos sob floresta com alta estabilidade na agregação é a tendência do solo da área P02 de diminuição da agregação com a profundidade.

3.3. Estoques de Carbono e Nitrogênio da soma das classes de tamanho de agregados de TPI

Como observado na figura 6, a soma dos estoques de carbono e nitrogênio das diferentes classes de agregados nas TPI não apresentaram uma redução em profundidade típica para solos amazônicos, como observado por Batjes e Dijkshoorn para diferentes tipos de solos da região,^{63,64} ou por Chagas e colaboradores ao avaliarem o impacto do cultivo de citros nos estoques de carbono e nitrogênio em TPI e Latossolos Amarelos localizados na cidade de Manacapuru (AM).⁷ Os estoques de C e N são menores nas camadas mais superficiais e maiores em subsuperfície, contrariando o que seria esperado devido à influência da fauna do solo e da vegetação sobre os horizontes superficiais (Figura 6), porém estando de acordo com o observado por Kern e Kamp.¹²

Também, foram observadas diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) nos estoques de C e N entre as duas áreas na camada mais superficial (0-5 cm), sendo que a área P02 apresentou os estoques de C e N aproximadamente 78 % e 144 % maiores que área P01, respectivamente (Figura 6). Conseqüentemente, os estoques de C e N da soma de todas as camadas (0-40 cm) foram estatisticamente diferentes entre estas áreas, sendo que a P02 possui um estoque total de C e N cerca de 40 % e 81 % maiores que a localidade P01, respectivamente. Enfatiza-se que as duas áreas deste estudo são formalmente reconhecidas como TPI e foram expostas à cultivo intenso,^{6,8,9,25-28,37} podendo-se deduzir que a área P02 apresenta uma maior recuperação da qualidade ambiental, no que tange à MOS, ocasionado pelo maior tempo de pousio (20 anos), ou que foi menos esgotada agricolamente pela população local (pré-Colombiana ou contemporânea). Os baixos valores de estoque de N apresentados podem ser devido às perdas no processo de queima da vegetação pelos habitantes pré-Colombianos.

Silva *et al.*⁵⁵ encontraram valores de estoque de carbono mais elevados do que os apresentados neste estudo ao avaliarem a MOS em diferentes profundidades (0-5, 5-10 e 10-20 cm) de solos TPI sob floresta

secundária em Novo Aripuanã (AM) e apontaram que práticas agrícolas influenciam na perda de estoques de carbono devido ao preparo do solo por aração e gradagem.⁵⁷

Como demonstrado na Figura 7, as relações C/N não apresentaram diferenças estatísticas significativas ($p < 0,01$) entre os solos de TPI, com exceção da camada 5-10 cm da área P02 que se apresentou 47 % acima do valor apresentado pela mesma camada da área P01. O aumento da relação C/N rumo à superfície nos perfis sugere um acréscimo da contribuição de material vegetal de alta relação C/N. Em solos amazônicos típicos seria um indicativo de maior humificação em profundidade.

Ao apresentarem baixos estoques de nitrogênio, e, conseqüentemente, altas relações C/N, os solos TPI refletem, possivelmente, os efeitos de longo tempo de cultivo, pois, geralmente o uso intenso do solo para agricultura eleva a relação C/N, já que está influenciada pela redução na mineralização de polissacarídeos e/ou à incorporação de carbono novo nas estruturas das substâncias húmicas. Os elevados valores de relação C/N do presente estudo, compararam-se com aqueles apresentados por solos com extremamente altos teores de carbono do estado do Pará, ou com solos com moderados a baixos teores de nitrogênio.⁷⁻¹²

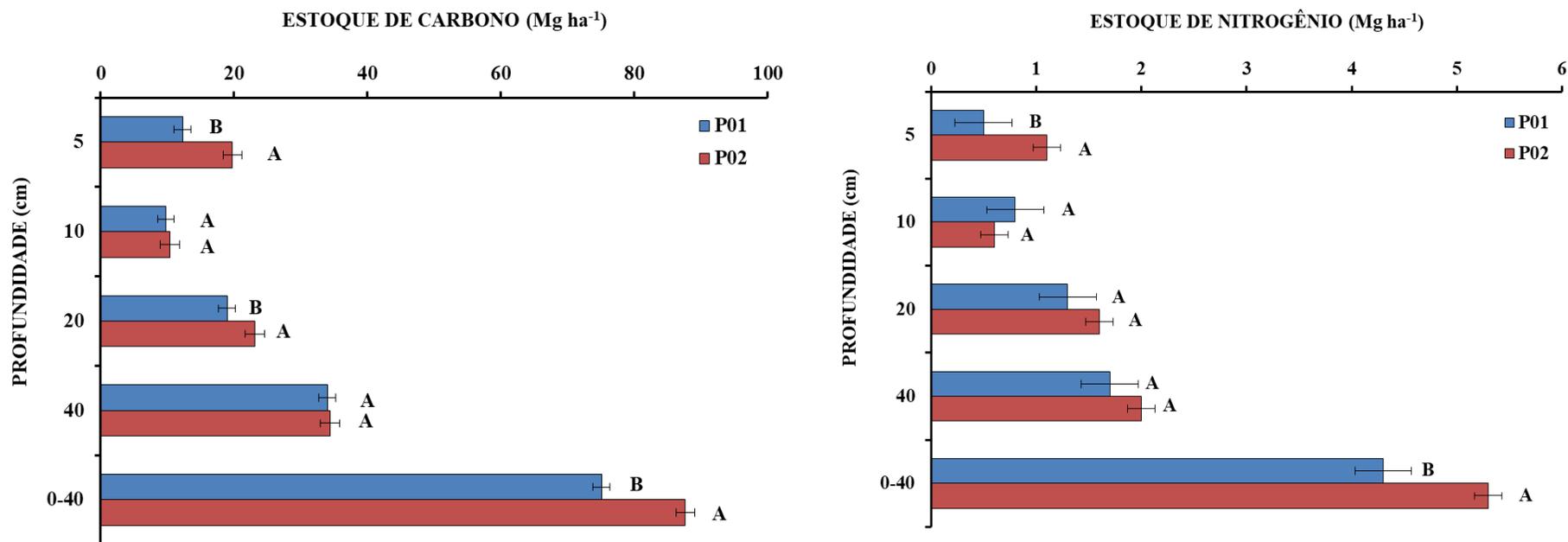


Figura 6. Estoques de carbono e nitrogênio das áreas avaliadas

A relação C/N indica o grau de incorporação do nitrogênio na estrutura das substâncias húmicas e o respectivo grau de humificação. Uma alta relação C/N como apresentada nestes solos TPI, indica baixa incorporação de nitrogênio e baixo grau de humificação. Contrariando o fato de que a matéria orgânica das TPI é mais inerte (pirogênicas), sendo por isso diferentes das MOS de solos normais. Logo, alguns índices consagrados, por exemplo, a relação C/N, nem sempre demonstram a correta indicação do que seria o certo pra solos normais; nas TPI tem-se um enriquecimento em carbono, assim a relação C/N é alta, mas isto não necessariamente significa que a MOS será pouco humificada.

Como dito anteriormente as altas relações C/N destas TPI podem sugerir ou incorporação de material com alta relação C/N, ou aumento da proliferação microbiana devido à fonte de energia fornecida pelo carbono, aumentando-se a oxidação da matéria orgânica, imobiliza-se grande parte do nitrogênio pelos microorganismos, influenciando o teor de N mineralizável, demonstrando com isso elevado teor de matéria orgânica ainda em decomposição.⁷⁻¹² Todavia, o mais provável é que ocorra uma maior influência do carbono pirogênico na MOS.

Em nenhuma camada de solo foi notada relação C/N que se encaixasse dentro da faixa que indica estabilidade biológica (C/N = 10 a 12).⁷⁻¹⁰ O que está de acordo com o pressuposto que a maior parte da matéria orgânica presente nas TPI é de origem pirogênica e não tanto da decomposição e migração vertical do material vegetal oriundo da biomassa da floresta.

Conforme pode ser observado na Figura 7 foram identificadas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre as duas áreas sob pousio quando foi avaliado o índice de estratificação (IE). A área P02 apresentou o IE para carbono 52 % e IE para nitrogênio 190 % mais elevados do que na área P01, respectivamente. Além disso, todos os IE calculados apresentaram-se abaixo do valor estipulado para uma alta qualidade da MOS (IE > 2,0).^{7,54} Assim como observado

por Chagas e colaboradores,⁷ os IE reforçam a tendência de baixa qualidade dos solos Amazônicos no tocante à MOS e indicam que o intenso uso agrícola nestas áreas antes dos atuais períodos de pousio acarretaram no decréscimo da qualidade do solo devido às perdas de carbono e nitrogênio nas camadas superficiais.

A MOS, representada pelos estoques de C e N, não influenciou significativamente ($P < 0,05$) na estabilidade de agregados destas áreas de TPI (Tabela 6). Embora a área P02 possua maiores estoques de C e N do que P01, em toda sua profundidade, a natureza do carbono pirogênico não proporcionou uma significativa melhoria na estabilização dos agregados indicando que estes solos não possuem uma grande proteção contra processos erosivos naturais ou antrópicos.⁴⁴ Ao que tudo indica, a Teoria da Organização Hierárquica de diferentes estágios de agregação não pode ser aplicada adequadamente em solos de TPI que apresentem mineralogia predominantemente caulínica, como é o caso destes solos,³⁷ pois a presença de óxidos e óxi-hidróxidos de ferro e alumínio de baixa cristalinidade podem agir mais fortemente como agente cimentante na macroagregação do solo do que a MOS.^{40,43,46,51-53}

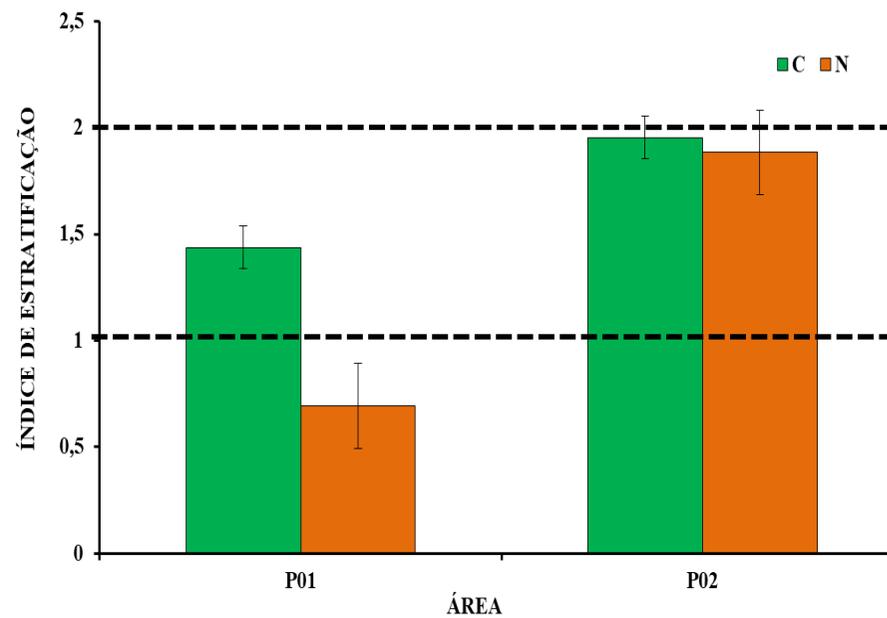
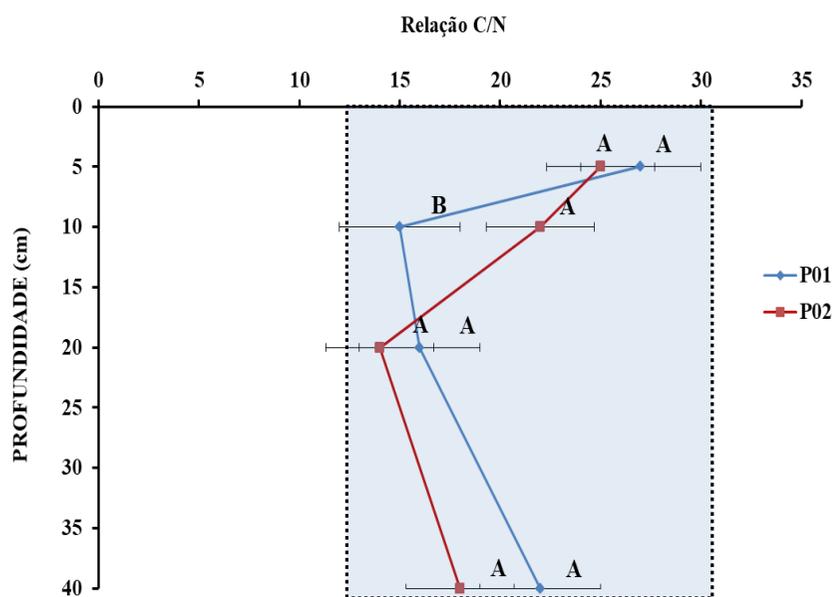


Figura 7. Relação C/N e Índice de Estratificação da MOS das áreas avaliadas

Tabela 6. Coeficientes de correlação de Pearson para relações entre índices de estabilidade de agregados e estoques de C e N.

Parâmetros	DMP	DMG	IEA	> 2,0 mm
Est C	0,413 ^{NS}	0,581 ^{NS}	0,256 ^{NS}	0,217 ^{NS}
Est N	0,419 ^{NS}	0,613 ^{NS}	0,332 ^{NS}	0,271 ^{NS}

DMP: Diâmetro Médio Ponderado; DMG: Diâmetro Médio Geométrico; IEA: Índice de Estabilidade de Agregados. NS: indica existência de diferença não significativa à um nível de probabilidade de 0,05

4. Conclusões

Os elevados tempos de pousio (10 e 20 anos) proporcionaram a recomposição florestal de forma natural nas duas áreas de Terra Preta de Índio avaliadas neste estudo (P01 e P02). Contudo, independente do tempo de pousio estas áreas apresentaram distribuição de classes de tamanho de agregados do solo muito semelhantes: macroagregação com predomínio de agregados nas classes de tamanho 0,25 e 0,50 mm. Além disso, foi identificado que estas áreas possuem alta suscetibilidade à erosão pluvial ou antrópica como pôde ser observado pelos baixos índices de estabilidade de agregados do solo apresentados (DMP, DMG, IEA(%), agregados > 2,00 m).

Estas Terras Pretas de Índio reforçam a inadequação da utilização da teoria da organização hierárquica de diferentes estágios de agregação para solos tropicais e sub-tropicais ácidos e altamente intemperizados, haja visto que para estes solos a matéria orgânica não desempenha um papel tão preponderante quanto os dos óxidos de ferro e alumínio como agente cimentante entre as partículas de solo.

Embora as Terras Pretas de Índio sejam importantes marcadores ambientais do impacto das atividades humanas pré-Colombianas na Região Amazônica, devido à sua suscetibilidade à erosão não possuem a adequada capacidade de preservação estratigráfica que as tornem elegíveis como *Golden Spikes* do início do Antropoceno.

Agradecimentos

À Alessandro Alves de Brito (*in memoriam*) pelo auxílio na confecção de mapas.

Referências Bibliográficas

- National Geographic. Amazonian under threat. Disponível em <https://www.nationalgeographic.com/climate-change/explore-amazonia/#/Map/Compare/?nav=true&focus=Interactive&baseOpacity=1>. Acesso em: 2 dezembro 2018.
- Oliveira, F. E. R.; Oliveira, J. M.; Xavier, A. S. Changes in Soil Organic Carbon Fractions in Response to Cover Crops in an Orange Orchard. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2016**, *40*, 1. [CrossRef]
- Silva, A. C. S.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal do Amazonas, Brasil, 2006. [Link]
- Padilha, F. J.; Silva, M. S.; Guimarães, R. S.; Cedano, J. C. C.; Oliveira, D. M.; Damaceno, J. B. D.; Achete, C. A.; Falcão, N. P. S. Uso da Espectroscopia Raman e FT-IR na Caracterização do Biocarvão em Latossolo Amarelo da Amazônia Central. *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 1996. [CrossRef]
- Guimarães, R. S.; Padilha, F. J.; Cedano, J. C. C.; Damaceno, J. B. D.; Gama, R. T.; de Oliveira, D. M.; Teixeira, W. G.; Falcão, N. P. S. Efeito Residual de Biocarvão e Pó de Serra nos Teores de Carbono e Nitrogênio Total em

- Latossolo Amarelo na Amazônia. *Revista Virtual de Química* **2017**, 9, 1996. [[CrossRef](#)]
- ⁶ Soares, R.; *Dissertação de Mestrado*, Universidade Federal Fluminense, Brasil, 2007. [[Link](#)]
- ⁷ Chagas, L. F. B.; Falcão, N. P. S.; Padilha, F. J.; Oliveira, D. M.; Guimarães, R. S.; 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. *Revista Virtual de Química* **2017**, 9, 2067. [[CrossRef](#)]
- ⁸ Mello, M. L. V.; Soares, R. Matéria orgânica em solos arqueológicos Amazônicos: Uma revisão. *Diversidade & Gestão* **2017**, 1, 189. [[Link](#)]
- ⁹ 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. [[Link](#)]
- ¹⁰ Kampf, N.; Kern, D. C. O Solo como Registro da Ocupação Humana Pré-Histórica na Amazônia. *Tópicos em Ciência do Solo* **2005**, IV, 277. [[Link](#)]
- ¹¹ 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](#)]
- ¹² Kern, D. C.; Kampf, N. Antigos Assentamentos Indígenas na Formação de Solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **1989**, 13, 219. [[CrossRef](#)]
- ¹³ Costa, M. L.; Kern, D. C. Geochemical signatures of tropical soils with archaeological black earth in the Amazon, Brazil. *Journal of Geochemical Exploration* **1999**, 66, 369. [[CrossRef](#)]
- ¹⁴ Campos, M. C. C.; Santos, L. A. C.; Silva, D. M. P.; Mantovanelli, B. C.; Soares, M. D. R. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. *Revista Agro@ambiente On-line* **2012**, 6, 102. [[CrossRef](#)]
- ¹⁵ Jorio, A.; Ribeiro-Soares, J.; Cançado, L. G.; Falcão, N. P. S.; Santos, H. F.; Baptista, D. L.; Ferreira, H. M.; Archanjo, B. S.; Achete, C. A. Microscopy and spectroscopy analysis of carbon nanostructures in highly fertile Amazonian anthrosoils. *Soil & Tillage Research* **2012**, 122, 61. [[CrossRef](#)]
- ¹⁶ Moline, E. F. V.; Coutinho, E. L. M. Atributos químicos de solos da Amazônia Ocidental após sucessão da mata nativa em áreas de cultivo. *Revista Ciências Agrárias* **2015**, 58, 14. [[CrossRef](#)]
- ¹⁷ Soares, M. D. R.; Campos, M. C. C.; Souza, Z. M.; Brito, W. M.; Franciscan, U.; Castioni, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. *Revista Ciências Agrárias* **2015**, 58, 434. [[CrossRef](#)]
- ¹⁸ Santos, L. A. C.; Araujo, J. K. S.; Souza, V. S.; Campos, M. C. C.; Correa, M. M.; Souza, R. A. S. Pedogenesis in the Archaeological Dark Earth – Mulatto Earth Catena over Volcanic Rocks in Western Amazonia, Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2018**, 42, 1. [[CrossRef](#)]
- ¹⁹ Santos, L. A.; Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Bergamin, A. C.; Silva, D. M. P.; Junior, J. M.; França, A. B. C. Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2013**, 37, 825. [[CrossRef](#)]
- ²⁰ Santos, L. A.; Campos, M. C. C.; Aquino, R. E.; Bergamin, A. C.; Silva, D. M. P.; Junior, J. M.; França, A. B. C. Caracterização física de seis sítios de terras pretas arqueológicas na região de Apuí-AM. *Revista Verde* **2011**, 6, 167. [[Link](#)]
- ²¹ Costa, A. R.; Junior, M. L.; Kern, D. C.; Ruivo, M. L. P.; Marichal, R. Forms of soil organic phosphorus at black earth sites in the Eastern Amazon. *Revista Ciência Agronômica* **2017**, 48, 1. [[CrossRef](#)]
- ²² Campos, M. C. C.; Ribeiro, M. R.; Júnior, V. S. S.; Filho, M. R. R.; Souza, R. V. C. C.; Almeida, M. C. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. *Bragantia* **2011**, 70, 598. [[CrossRef](#)]

- ²³ 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* **2015**, *282*, 1. [CrossRef]
- ²⁴ Macedo, R. S.; Teixeira, W. G.; Correa, M. M.; Martins, G. C.; Vidal-Torrado, P. Pedogenetic process in anthrosols with preitic horizon (Amazonian Dark Earth) in Central Amazon, Brazil. *PLoS ONE* **2017**, *12*, 1. [CrossRef]
- ²⁵ Cunha, T. J. F.; Madari, B. E.; Canellas, L. P.; Ribeiro, L. P.; Benites, V. M.; Santos, G. A. Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **2009**, *3*, 85. [CrossRef]
- ²⁶ Silva, A. K.; Guimarães, J. T. F.; Lemos, V. P.; Costa, M. L.; Kern, D. C. Mineralogia e geoquímica de perfis de solo com Terra Preta Arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia. *Acta Amazonica* **2012**, *42*, 477. [CrossRef]
- ²⁷ Lemos, V. P.; Meireles, A. R. O.; Fernandes, K. G.; Moraes, M. C.; Costa, M. L.; Silva, A. K. T.; Kern, D. C. Nutrients in Amazonian Black Earth from Caxiuanã Region. *Journal Brazillian Chemical Society* **2011**, *22*, 772. [CrossRef]
- ²⁸ Junqueira, A. B.; Stomph, T. J.; Clement, C. R.; Struik, P. C. Variation in soil fertility influences cycle dynamics and crop diversity in shifting cultivation systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2016**, *215*, 122. [CrossRef]
- ²⁹ Junqueira, A. B.; Souza, N. B.; Stompha, T.J.; Almekinders, C.J.M.; Clementc, C R.; Struika P.C. Centre for Crop Systems. Soil fertility gradients shape the agrobiodiversity of Amazonian homegardens. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **2016**, *221*, 270. [CrossRef]
- ³⁰ Certini, G.; Scalenghe, R. Anthropogenic soils are the golden spikes for the Anthropocene. *The Holocene* **2011**, *21*, 1269. [CrossRef]
- ³¹ Certini, G.; Scalenghe, R. Is the Anthropocene really worthy of a formal geologic definition? *The Anthropocene Review* **2015**, *2*, 77. [CrossRef]
- ³² Certini, G.; Scalenghe, R. Anthropogenic soils as marker. *Encyclopedia of the Anthropocene* **2018**, *2*, 129. [CrossRef]
- ³³ Silva, C. M.; Arbilla, G. Antropoceno: Desafios de um novo mundo. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1619. [CrossRef]
- ³⁴ Silva, C. M.; Arbilla, G.; Soares, R.; Machado, W. A nova idade *Meghalayan*: O que isso significa para a Época do Antropoceno? *Revista Virtual de* **2018**, *10*, 1648. [CrossRef]
- ³⁵ Meyer, R. Geology's Timekeepers are Feuding. *The Atlantic. Science*. July 20, 2018. Disponível em: <https://www.theatlantic.com/science/archive/2018/07/anthropocene-holocene-geology-drama/565628/>. Acesso em: 04 agosto de 2018.
- ³⁶ Zalasiewicz, J.; Waters, C. N.; Summerhayes, C. P.; Wolfe, A. P.; Barnosky, A. D.; Cearreta, A.; Crutzen, P.; Ellis, E.; Fairchild, I. A.; Gałuszka, A.; Haff, P.; Hajdas, P.; Head, M. J.; Sul, J. A. I.; Jeandel, C.; Leinfelder, J. R.; McNeill, J. H.; Neal, C.; Odada, E.; Oreskes, N.; Steffen, W.; Syvitski, J.; Vidas, D.; Wagreich, M.; Williams, M. The Working Group on the Anthropocene: Summary of evidence and interim Recommendations. *Anthropocene* **2017**, *19*, 55. [CrossRef]
- ³⁷ 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]
- ³⁸ Gale, S. J.; Hoare, P. G. The stratigraphic status of the Anthropocene. *The Holocene* **2012**, *22*, 1491. [CrossRef]

- ³⁹ Edgeworth, M.; Richter, D.; Waters, C. N.; Haff, P.; Neal, C.; Price, S. J. Diachronous beginnings of the Anthropocene: The lower bounding surface of anthropogenic deposits. *The Anthropocene Review* **2015**, *2*, 33. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁰ Wang, Y.; Ran, L.; Fang, N.; Shi, Z. Aggregate stability and associated organic carbon and nitrogen as affected by soil erosion and vegetation rehabilitation on the Loess Plateau. *CATENA* **2018**, *167*, 257. [[CrossRef](#)]
- ⁴¹ Udom, B. E.; Omovbudue, S. Soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in stable aggregates under legume and grass fallow. *Acta Ecologica Sinica* **2018**, no prelo. [[CrossRef](#)]
- ⁴² Comin, J. J.; Ferreira, L. B.; Santos, L. H.; Koucher, L. P.; Machado, L. N.; Santos, E.; Mafra, A. L.; Kurtz, C.; Souza, M.; Brunetto, G. Loss, A. Carbon and nitrogen contents and aggregation index of soil cultivated with onion for seven years using crop successions and rotations. *Soil and Tillage Research* **2018**, *184*, 195. [[CrossRef](#)]
- ⁴³ Tivet, F. E.; Sá, J. C. M.; Lal, R.; Briedis, C.; Borszowskei, P. R.; Santos, J. B.; Farias, A.; Eurich, G.; Hartman, D. C.; Nadolny, M. Aggregate C depletion by plowing and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. *Soil and Tillage Research* **2013**, *126*, 203. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁴ Zeng, Q.; Darboux, F.; Man, C.; Zhu, Z.; An, S. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China). *CATENA* **2018**, *167*, 276. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁵ An., S.; Darboux, F.; Cheng, M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma* **2013**, *209*, 75. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁶ Deng, L.; Kim, D.; Peng, C.; Shagguan, Z. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China. *Land Degradation and Development* **2018**, *29*, 3974. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁷ Madari, B. E.; Sombroek, W. G.; Woods, W. I. Em *Explorations in Amazonian Dark Earths*; 1 ed., Lehmann, J.; Kern, D. C.; B. Glaser; W. I. Woods. Springer-Verlag: Heidelberg, p. 169-181, 2004.
- ⁴⁸ Madari, B. E.; Machado, P. L. O. A.; Torres, E.; Andrade, A. G.; Valencia, L. L. O. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. *Soil & Tillage Research* **2005**, *80*, 185. [[CrossRef](#)]
- ⁴⁹ Barreto, R. C.; Madari, B. E.; Maddock, J. E. L.; Machado, P. L. O. A.; Torres, E.; Franchini, J.; Costa, A. R. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **2009**, *132*, 243. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁰ Peixoto, R. S.; Coutinho, H.L.C; Madari, B. E.; Machado, P. L. O. de A; Rumjanek, N. G; Elsas, J. D; Seldin, L.; Rosado, A. S. Soil aggregation and bacterial community structure as affected by tillage and cover cropping in the Brazilian Cerrados. *Soil & Tillage Research* **2006**, *90*, 16. [[CrossRef](#)]
- ⁵¹ Lopes, I. M.; Ziviani, M. M.; Pinto, L. A. S.; Pinheiro, E. F. M.; Weber, H.; Pereira, M. G.; Lima, E.; Campos, D. V. B. Agregação e Distribuição do Carbono nos Agregados de Latossolo Vermelho sob Diferentes Níveis de Palhada da Cana-de-Açúcar em Paranaíba (PR). *Revista Virtual de Química* **2017**, *9*, 1985. [[CrossRef](#)]
- ⁵² Oades, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. *Plant and Soil* **1984**, *76*, 319. [[CrossRef](#)]
- ⁵³ Oades, J. M.; Water, A. G. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research* **1991**, *29*, 815. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁴ Franzluebbers, A. J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil and Tillage Research* **2002**, *66*, 95. [[CrossRef](#)]
- ⁵⁵ Silva, L. F. D.; Cunha, J. M.; Campos, M. C. C.; Lima, A. F. L.; Pantoja, J. C. M.; Soares, M. D. R.; Mantovanelli, B. C. Variabilidade espacial

- de agregados e estoque de carbono em solos antropogênicos sob floresta nativa. *Pesquisas Agrárias e Ambientais* **2017**, *5*, 509. [CrossRef]
- ⁵⁶ Pantoja, J. C. M.; Cunha, J. M.; Campos, M. C. C.; Silva, L. F. D.; Mendonça-Júnior A. F. Distribuição dos agregados em terra preta arqueológica de áreas cultivadas no município de Novo Aripuanã, Amazonas. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável* **2015**, *10*, 5. [CrossRef]
- ⁵⁷ Cunha, J. M.; Gaio, D. C.; Campos, M. C. C.; Soares, M. D. R.; Silva, D. M. P.; Lima, A. F. L. Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. *Revista Ambiente e Água* **2017**, *12*, 263. [CrossRef]
- ⁵⁸ Soares, M. D. R.; Campos, M. C. C.; Cunha, J. M.; Mantovanelli, B. C.; Oliveira, I. A. M.; Brito, E. L. G.; Leite, A. F. L. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. *Gaia Scientia* **2018**, *12*, 125. [CrossRef]
- ⁵⁹ Teixeira, W. G.; Martins, G. C. Em *Amazonian Dark Earths*; Lehman, J; Kern, D. C.; Glaser, B.; Woods, W. I., Kluwer Academic Publisher: Dordrecht, p. 271-286, 2003.
- ⁶⁰ Ulery, A. L.; Graham R. C.; Bowen, L. H. Forest fire effects on phyllosilicates in California. *Soil Science Society of America Journal* **1996**, *60*, 309. [CrossRef]
- ⁶¹ Ketterings Q. M.; Bigham, J. M.; Laperche, V. Changes in soil mineralogy and texture caused by slash and burn fires in Sumatra, Indonesia. *Soil Science Society of America Journal* **2000**, *64*, 1108. [CrossRef]
- ⁶² Wendling, B.; Jucksch, I.; Mendonça, E.; Neves, J. C. L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária brasileira* **2005**, *40*, 487. [CrossRef]
- ⁶³ Batjes, N. H.; Dijkshoorn, J. A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma* **1999**, *89*, 273. [CrossRef]
- ⁶⁴ Batjes, N. H. Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use and Management* **2005**, *21*, 22. [CrossRef]