

Capacidade de Estocagem de Carbono e Nitrogênio em Solos Antrópicos e Não Antrópicos sob Florestas Secundárias no Estado do Amazonas

Carbon and Nitrogen Storage Capacity in Anthropogenic and Non-Anthropogenic Soils under Secondary Forests in the State of Amazonas

Ricardo Soares,^{a,b,*} David Vilas Boas de Campos,^{a,c} Beata Emoke Madari,^d Pedro Luiz de Oliveira de Almeida Machado,^d John Edmund Lewis Maddock^e

^aUniversidade Veiga de Almeida, Campus Tijuca, Programa de Pós-Graduação em Ciências do Meio Ambiente, CEP 20271-020, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^bInstituto Estadual do Ambiente, CEP 20081-312, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^cEmbrapa Solos, CEP 22460-000, Rio de Janeiro-RJ, Brasil

^dEmbrapa Arroz e Feijão, CEP 75375-000, Santo Antônio de Goiás-GO, Brasil

^eUniversidade Federal Fluminense, Campus do Valonguinho, Departamento de Geoquímica, CEP 24020-150, Niterói-RJ, Brasil

*E-mail: Ricardo.soares@uva.br

Submissão: 24 de Novembro de 2024

Aceite: 28 de Agosto de 2025

Publicado online: 8 de Setembro de 2025

The increasing deforestation rates in the Brazilian Amazon region have the potential to significantly alter the cycling and storage of carbon and nitrogen, with indirect negative impacts on the homeostatic balance of the Earth System's atmosphere. Carbon and nitrogen in soils under secondary Amazonian forests play a fundamental role in global climate change mitigation, making it crucial to understand their storage capacity in Amazonian Dark Earths and non-anthropogenic soils within the Amazon Basin. This study determined the concentrations and stocks of carbon and nitrogen in Amazonian Dark Earths (P01 and P02) and non-anthropogenic soils in the state of Amazonas (P03, P04 and P05), under secondary forest vegetation, to evaluate the influence of different fallow periods. The Amazonian Dark Earths in the P02 area exhibited an 8.5% higher carbon storage capacity compared to the P01 area, which had a shorter fallow period (10 years). Non-anthropogenic soils in other areas demonstrated typical carbon storage capacities consistent with the regional and national averages of approximately 100 Mg Ha⁻¹ m⁻¹. The C:N ratio and nitrogen stocks suggest a predominance of pyrogenic-origin materials in the Amazonian Dark Earths areas and fresh plant-derived materials in the non-anthropogenic soils.

Keywords: Anthropocene; great acceleration; amazonian dark earth; climate change.

1. Introdução

O Antropoceno é o atual evento geológico, informalmente reconhecido, no qual a Humanidade adquiriu o *status* de principal agente geomorfológico modificador da paisagem no Sistema Terra.¹⁻³ Ao longo das duas últimas décadas, a comunidade científica internacional vem atingindo um consenso cada vez maior de que o Antropoceno se iniciou no período conhecido como “A Grande Aceleração”, logo após as inúmeras detonações dos artefatos termonucleares pelas principais potências atômicas da Guerra Fria.³⁻⁵

Dentre as principais características do Antropoceno estão: o crescimento demográfico exponencial; a utilização massiva de combustíveis fósseis; o crescente fluxo de trocas comerciais internacionais de *commodities*, produtos industrializados e serviços; o aumento da perda de biodiversidade decorrente pela intensificação do desmatamento e mudança de uso da terra; acentuação das trocas intercontinentais de pessoas, genes, patógenos, espécies animais e vegetais por conta das facilidade de deslocamento proporcionada pela modernização do transporte e pela globalização econômica.^{1,3,5-7} Consequentemente, esses fatores levaram a um momento disruptivo em que a qualidade ambiental do Sistema Terra vem sofrendo severos impactos negativos: aumento das concentrações de CO₂ e CH₄ (Gases de Efeito Estufa - GEE);^{1,3} perda irreversível de diversidade genética, configurando-se na Sexta Extinção das espécies;¹ aumento do número de epidemias e pandemias, dentre elas a COVID-19;^{6,7} alterações nos ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrogênio e fósforo entre outros.¹

A crescente demanda global por alimentos e por fontes alternativas e renováveis de energia, decorrente do rápido aumento populacional e do contínuo avanço tecnológico, tem exigido a expansão das áreas cultivadas em diversas regiões do planeta, além de um expressivo incremento da produtividade agropecuária.^{1,4} Desde a Revolução Verde, durante a Grande Aceleração,⁴ recorreu-se à inovação tecnológica e aumentou-se a produtividade com o uso massivo de fertilizantes sintéticos, seleção de sementes geneticamente melhoradas, aumento da mecanização agrícola, que apresentam altos custos econômicos e se manejados inadequadamente, podem acarretar na degradação das qualidades pedológicas do solo, trazendo significativos impactos

ambientais negativos à segurança alimentar da população e ao aumento das concentrações de GEE que influenciam profundamente o equilíbrio homeostático da atmosfera do Sistema Terra.^{1,4}

Nesse contexto, o entendimento científico da dinâmica da Matéria Orgânica do Solo (MOS) possui um papel decisivo nas avaliações sociais, econômicas e ambientais que subsidiam a adoção de práticas agrícolas modernas mais racionais e efetivas que proporcionem ganho em escala econômica, sem comprometer a capacidade de atender às necessidades das futuras gerações.⁸

A MOS tem um enorme potencial de agir como um dreno de carbono e nitrogênio atmosféricos, agindo, com isso, como um feedback negativo na diminuição das concentrações de GEEs antropogênicos, um fenômeno de preocupação global. O sequestro de carbono e nitrogênio em ecossistemas naturais apresenta-se como importante fator mitigador das mudanças climáticas, pois as alternativas de mudança no uso da terra (conversão de floresta em lavouras e pastagens) acarretam na diminuição significativa da capacidade de estocagem de C e N no solo.⁹ Logo, são desenvolvidas mundialmente pesquisas que proponham a adoção de métodos alternativos inovadores, que sejam o mais conservacionistas possíveis, como por exemplo, a adoção do plantio direto em detrimento ao plantio convencional, a adoção de sistemas agroflorestais, Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPF),¹⁰ assim como o pousio para regeneração de áreas cultivadas para que com o intermédio da sucessão secundária possam voltar a se tornarem florestas novamente.¹¹

Neste contexto de uma maior conscientização ambiental internacional, e pela busca permanente de novas alternativas para atenuação dos impactos do efeito estufa antropogênico, insere-se o estudo dos solos arqueológicos manejados por antigas populações indígenas na Região Amazônica. Tais solos, conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI) possuem a capacidade de serem um grande dreno de carbono e nitrogênio, superando em mais que o dobro a capacidade de retenção de carbono em uma ampla variedade de Solos Não Antrópicos (SNA) da bacia amazônica.¹² Além disso, deve-se ressaltar também o aspecto qualitativo nas TPIs, pois em tais localidades a MOS possui a capacidade de se apresentar sob formas altamente estáveis, como o carbono pirogênico oriundo da queima da biomassa e que é o principal constituinte do *Black Carbon*, que por sua vez é capaz de ser estocado nos solos por centenas, senão milhares de anos.^{8,11,13-17}

Embora o carbono pirogênico que gerou o *Black Carbon* nas TPIs seja resultado da combustão incompleta da serrapilheira natural ou de restos alimentares de populações pré-Colombianas, o que por si só favorece um *feedback* positivo nas emissões líquidas de carbono (naquele momento histórico), ao serem “incorporados” ao solo por esses povos passou a atuar em um *feedback* negativo e como condicionante do solo devido às suas inúmeras qualidades intrínsecas como fonte de MOS.^{11,15-17}

Logo, torna-se imprescindível conhecer o comportamento e a capacidade de estocagem da MOS em TPIs para que sejam fornecidos os devidos subsídios teóricos para o avanço do conhecimento científico que possa proporcionar a replicação efetiva de tais processos pedogênicos, que poderão proporcionar benefícios significativos ao aumento da produção de pequenos agricultores amazônicos, que costumeiramente são proprietários de terras pouco férteis (Latosolos e Argissolos típicos da Região Amazônica), com isso amenizando a insegurança alimentar na região. Além disso, poderão também servir como produtos tecnológicos baseados em conhecimento tradicional capazes de mitigar ou atenuar os impactos decorrentes do aumento das concentrações de GEEs que acarretam o aumento da temperatura no Sistema Terra, acentuando ainda mais as mudanças climáticas no Antropoceno.^{1,8}

Mediante tudo o que foi exposto anteriormente, esse estudo tem como objetivos: (i) determinar os estoques de carbono e nitrogênio de 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 duas áreas de Terras Pretas de Índio.

2. Material e Métodos

2.1. Descrição das áreas de estudo

Os solos avaliados neste estudo (TPIs e SNAs) estão localizados nos municípios de Rio Preto da Eva, Humaitá, Novo Aripuanã e Apuí, todos pertencentes ao estado do Amazonas, e foram descritos pedologicamente com ênfase nas características químicas e físicas por Soares *et al.*¹¹ 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 (Figura 1). Além disso, as demais áreas SNAs (P03, P04 e P05) estão situadas em Argissolos sob florestas secundárias, sem que haja registro cronológico dos respectivos tempos de pousios.

Segundo Soares *et al.*,¹¹ 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 pluviais 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

Para a coleta de amostras nessas áreas de TPIs e SNAs foram abertas quatro trincheiras, sendo que nas duas áreas de TPIs (P01 e P02) foram coletadas amostras em sete

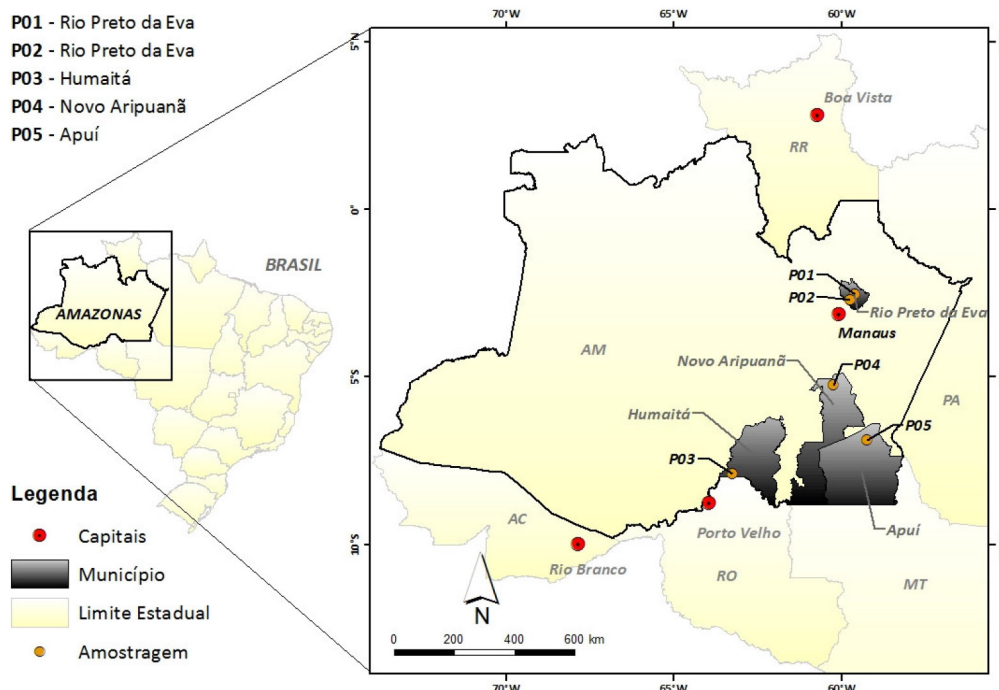


Figura 1. Localização georreferenciada das amostras de solo sob florestas secundárias

camadas estratigráficas costumeiramente usadas em estudos de determinação de estoques de C e N (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 os estoques de C e N, assim como a dinâmica da MOS em solos amazônicos típicos sob florestas secundárias. 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).

2.3. Determinação das concentrações de Carbono e Nitrogênio do solo

As concentrações de C e N foram determinadas,¹⁸ em triplicata, nas amostras de TFSA por intermédio de um analisador elementar automático modelo PE 2400 series II CHNS/O Analyzer da marca Perkin-Elmer, totalizando 720 determinações elementares. Utilizou-se aproximadamente 2,0±1,0 mg de TFSA 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 um branco para cada seis amostras e de um padrão de referência para cada 15 amostras de solos. Além disso, as concentrações de carbono 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 (%) apresentado pela técnica analítica foi de no máximo 3%.

2.4. Determinação da densidade do solo

Foram determinadas as densidades dos solos (ρ) em todas as amostras utilizando-se anéis de Kopecky com volumes totais de aproximadamente 50 cm³, e transferindo-se para sacos plásticos vedados.¹⁸ Secaram-se as amostras em estufa a 105 °C, por 48 horas, pesaram-se e fizeram-se as determinações usando-se a equação 1:

$$\rho = \frac{\text{Massa da amostra}}{\text{Volume do anel}} \quad (1)$$

onde: ρ = Densidade da amostra (kg m⁻³); M = Massa da amostra (kg); ρ = Volume do anel de Kopecky (m³).

2.5. Determinação dos estoques de Carbono e Nitrogênio do solo

Os estoques de carbono (EC) e de nitrogênio (EN) nas amostras foram calculados multiplicando-se as respectivas concentrações de C e/ou N no solo em uma determinada camada pela sua densidade e espessura da camada. Os EC e EN foram obtidos conforme pode ser observado pela equação 2:

$$E_x = \frac{X \times \rho \times e}{10} \quad (2)$$

onde: E_x = Estoque de C ou de N acumulado na amostra

(Mg ha⁻¹); X = Concentração de C ou N na amostra (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 casualizado completo e apenas entre os solos P01 e P02, o que resultou 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 empresa *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 atributos avaliados nas áreas de SNAs são apresentadas somente com seus respectivos desvios-padrão e com caráter meramente informativo, para fins futuros em que possam servir como áreas-controle sob vegetação secundária na Região Amazônica.

3. Resultados e Discussão

3.1. Concentrações de Carbono e Nitrogênio nos solos

Conforme pode ser observado na Tabela 1, as concentrações de carbono variaram de 4,4 a 23 g kg⁻¹ na área P01, situando-a como uma área de médio teor de MOS no intervalo de profundidade de 0-40 cm e de baixa concentração no intervalo acima de 40 cm, segundo classificação elaborada por Kern e Costa.¹⁹ Ao longo da área P02 observou-se uma variação de 4,3 a 41,0 g kg⁻¹, posicionando-a como área de alto teor de MOS na camada mais superficial (0-5 cm), médio teor subsuperficialmente (5-40 cm) e com baixa concentração de MOS no intervalo restante (> 40 cm). Os SNAs apresentaram distribuições de carbono bem próximas entre si: na área P03 a concentração de carbono variou de 4,0 a 13,0 g kg⁻¹; na área P04 variou de 4,7 a 30,0 g kg⁻¹ e na área P05 variou de 3,5 a 14,0 g kg⁻¹, com exceção da camada mais superficial da área P04 que foi classificada como de alto teor de carbono, todos os horizontes pedológicos em todos os SNAs apresentaram baixa concentração de MOS (Tabela 1).

As concentrações de carbono nas áreas de TPIs foram próximas ou superiores, quando comparadas com a MOS apresentadas em diferentes áreas de TPIs na Bacia Amazônica e apresentando uma mesma tendência de queda suave com a profundidade.^{8,13,19-23} Devido as concentrações de C serem em média maiores que 10,0 g kg⁻¹ em grandes profundidades (> 40 cm), apresentarem evidências visuais de atividade antrópica (fragmentos cerâmicos e pedaços de carvões depositados por populações pré-Colombianas),^{11,16} tem-se a comprovação irrefutável que as duas áreas são classificadas como TPIs.²⁴

Segundo classificação elaborada por Madari *et al.*,¹⁵ as concentrações de carbono nas áreas de TPIs as situariam como solos sob floresta, porém quando se correlaciona essas mesmas concentrações de carbono com os valores de Capacidade de Troca Catiônica obtidos por Soares *et al.*,^{11,16} nessas mesmas amostras percebe-se que as áreas P01 e P02 são melhor classificadas como áreas sob cultivo intenso, o que é altamente coerente, haja visto que os respectivos tempos de pousio (10 e 20 anos, respectivamente) são relativamente curtos para que a sucessão vegetal secundária se estabeleça de maneira plena e possa ofertar o aporte necessário de serrapilheira com a mesma intensidade de uma floresta secundária consolidada.

As concentrações de carbono apresentaram diferenças estatísticas significativas (p-valor < 0,05) entre os solos da área P01 e P02, no intervalo de profundidade de 0-60 cm, sendo sempre os maiores resultados verificados na área P02, variando em uma taxa de 12 a 44%. Grandes variações espaciais nas concentrações de C, e outros elementos, em um mesmo sítio arqueológico ou áreas muito próximas de TPIs podem ser um reflexo do tempo de ocupação e da densidade populacional humana da região no período pré-Colombiano,²⁴ sendo inclusive evidenciado em diversas pesquisas.^{14,19-22} Altas concentrações de carbono em TPIs situadas em ambientes com temperaturas e precipitações pluviométricas elevadas, como é o caso desse estudo, podem ser atribuídas, também, à formação de complexos estáveis entre a matéria orgânica e o cálcio, assim como à composição da própria MOS rica em *Black Carbon*.

Embora os SNAs não façam parte do delineamento estatístico, foi observado que as concentrações de carbono nesses solos são muito inferiores, quando comparadas com os resultados obtidos nas TPIs, corroborando a afirmação que esses solos arqueológicos são muito mais ricos em MOS do que em áreas adjacentes ou representativas da Região Amazônica.^{14,15,22,25} Por outro lado, as concentrações de carbono das áreas P01 e P02 foram maiores que as encontradas por Hughes *et al.*,²⁷ para três áreas sob florestas primárias, capoeiras e sob pasto no estado de Rondônia.

Como pode ser observado na Tabela 1, as concentrações de nitrogênio, assim como as relações C:N não apresentaram diferenças estatísticas significativas (p-valor < 0,05) entre as TPIs, sendo que o aumento das relações C:N rumo à superfície sugere um maior aporte de material vegetal fresco dotado de alta relação C:N, que em SNAs poderia ser um indício de aumento da humificação da MOS, mas nesse caso é mais uma confirmação da presença de *Black Carbon* nesses solos de TPI. As concentrações de N nas TPIs variaram de moderadas (0-20 cm) a baixas nas camadas mais profundas (>20 cm). Por outro lado, nos SNAs as concentrações de nitrogênio apresentaram-se elevadas e praticamente constantes, indicando uma situação mais próxima do ideal para disponibilização de biomassa vegetal para a decomposição microbiana do solo. As TPIs ao apresentarem concentrações de nitrogênio baixas ([N] ≤ 1,0 g kg⁻¹) em mais de 64% dos casos, se destacaram das tendências típicas

Tabela 1. Concentrações de carbono e nitrogênio (g kg^{-1}) em TPIs e SNAs

Profundidade (cm)	C	N	C:N
P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico			
0-5	23,0 $\pm$ 6,0 a	0,9 $\pm$ 0,4 a	27,0 $\pm$ 8 a
5-10	16,0 $\pm$ 0,6 a	1,3 $\pm$ 0,5 a	15,0 $\pm$ 8 a
10-20	16,0 $\pm$ 2,0 a	1,2 $\pm$ 0,4 a	16,0 $\pm$ 5 a
20-40	13,7 $\pm$ 1,0 a	0,7 $\pm$ 0,3 a	22,0 $\pm$ 6 a
40-60	7,4 $\pm$ 0,4 a	0,7 $\pm$ 0,2 a	12,0 $\pm$ 6 a
60-80	8,0 $\pm$ 7,0 a	0,6 $\pm$ 0,4 a	13,0 $\pm$ 3 a
80-100	4,4 $\pm$ 1,0 a	0,6 $\pm$ 0,3 a	10,0 $\pm$ 8 a
P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico			
0-5	41,0 $\pm$ 9,0 a	2,2 $\pm$ 1,1 a	25,0 $\pm$ 18 a
5-10	21,0 $\pm$ 3,0 b	1,2 $\pm$ 0,5 a	22,0 $\pm$ 13 a
10-20	21,0 $\pm$ 3,0 b	1,5 $\pm$ 0,2 a	14,0 $\pm$ 2 a
20-40	15,5 $\pm$ 2,2 b	0,9 $\pm$ 0,2 a	18,0 $\pm$ 3 a
40-60	11,0 $\pm$ 1,0 b	0,8 $\pm$ 0,1 a	15,0 $\pm$ 4 a
60-80	6,0 $\pm$ 1,0 a	0,5 $\pm$ 0,2 a	14,0 $\pm$ 4 a
80-100	4,3 $\pm$ 0,4 a	0,3 $\pm$ 0,1 a	15,0 $\pm$ 4 a
P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa			
0-23	13 $\pm$ 0,5	2,5 $\pm$ 0,1	5,2 $\pm$ 0,2
23-38	9,6 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 0,1	4,7 $\pm$ 0,5
38-50	7,4 $\pm$ 0,3	1,7 $\pm$ 0,1	4,2 $\pm$ 0,2
50-77	6,4 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,1	3,3 $\pm$ 0,1
77-110	5,5 $\pm$ 0,3	1,9 $\pm$ 0,1	2,9 $\pm$ 0,1
110-200	4,0 $\pm$ 0,3	1,6 $\pm$ 0,1	2,4 $\pm$ 0,1
P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa			
0-10	30,2 $\pm$ 0,9	3,1 $\pm$ 0,1	9,8 $\pm$ 0,4
10-25	13,4 $\pm$ 0,5	2,8 $\pm$ 0,2	4,8 $\pm$ 0,2
25-70	7,8 $\pm$ 0,3	2,0 $\pm$ 0,2	4,0 $\pm$ 0,2
70-120	5,4 $\pm$ 0,2	2,2 $\pm$ 0,1	2,5 $\pm$ 0,1
120-200	4,7 $\pm$ 0,2	2,5 $\pm$ 0,1	1,9 $\pm$ 0,2
P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa			
0-30	14 $\pm$ 0,5	2,2 $\pm$ 0,1	6,5 $\pm$ 0,4
30-50	10,0 $\pm$ 0,4	2,4 $\pm$ 0,1	4,2 $\pm$ 0,3
50-96	4,7 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,1	2,5 $\pm$ 0,2
96-140	4,2 $\pm$ 0,2	1,6 $\pm$ 0,1	2,7 $\pm$ 0,2
140-200	3,5 $\pm$ 0,2	1,9 $\pm$ 0,1	1,9 $\pm$ 0,2

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 ($p < 0,05$).

de SNAs da Região Amazônica, como pode ser comprovado pelos SNAs desse estudo que apresentaram concentrações de N acima de $1,0 \text{ g kg}^{-1}$ em 100% dos casos e acima de 2 g kg^{-1} em 63% dos resultados apresentados. Consequentemente, as baixas concentrações de N acarretam maiores relações C:N, e podem ser consequência dos longos tempos de cultivo nessas áreas, pois geralmente o uso intensivo do solo para atividades agrícolas eleva a relação C:N, por estar diretamente relacionada à redução na mineralização de polissacarídeos e/ou incorporação de carbono novo nas estruturas das substâncias húmicas.

As concentrações de N nas TPIs estão muito próximas aos que foram encontrados em solos sob florestas secundárias, terciárias e em um solo sob pasto em Rondônia,²⁷ enquanto os valores apresentados pelos SNAs são mais condizentes com os apresentados por dois solos sob floresta primária intacta e em uma área de floresta primária recém derrubada. Além disso, os resultados para N estiveram abaixo daqueles apresentados pelos poucos trabalhos que avaliaram o teor de N em TPIs disponíveis na literatura.^{8,13,20} Semelhanças entre valores baixos de N em TPI foram encontradas em um experimento visando à

replicação artificial de TPIs utilizando SNA sob cultivo em uma área próxima a Manaus,²⁶ e com valores determinados em quatro sítios arqueológicos diferentes também próximos a Manaus.²³ Os elevados valores de relação C:N do presente estudo são comparáveis com aqueles apresentados por solos com teores elevados de carbono do estado do Pará, ou com solos com moderados a baixos teores de N.^{23,26}

A relação C:N indica o grau de incorporação do N na estrutura das substâncias húmicas e, consequentemente, o grau de humificação. Uma alta relação C:N como apresentado nas TPIs, indica baixa incorporação de N e baixo grau de humificação,⁸ corroborando o fato que a MOS das TPIs são mais inertes devido principalmente à sua origem pirogênica, que proporciona uma matéria orgânica diferenciada, quando se compara com as MOS de SNAs. Logo, a relação C:N nem sempre pode ser utilizada como parâmetro que forneça indício de qual seria a tendência mais usual para solos ditos normais, pois nas TPIs o enriquecimento em carbono eleva a relação C:N, mas isto não significa, necessariamente, que a MOS será pouco humificada. Além disso, as altas relações C:N das TPIs podem sugerir ou incorporação de material com alta relação C:N, ou um significativo aumento da proliferação microbiana devido à fonte de energia fornecida pelo Carbono, que conferirá um aumento da oxidação da MOS, o que proporcionará a imobilização de fração significativa do N pelos microorganismos, que influenciará no teor de N mineralizável, demonstrando com isso elevado teor de MOS ainda em decomposição. Todavia, o mais provável é que ocorra uma maior influência do *Black Carbon* na MOS, ao se considerar as altas relações C:N.

Surpreendentemente, em nenhum dos solos avaliados foi verificada relação C:N que se encaixasse dentro da faixa que indica estabilidade biológica ($10 \leq C/N \leq 12$). Nos SNAs os valores das relações C:N encontram-se abaixo dessa faixa, indicando que nestes solos o processo de mineralização secundária é maior, evidenciando a baixa resistência a este processo das substâncias húmicas presentes, sugerindo uma maior presença de fragmentos de proteínas de peptídeos nas mesmas, o que está de acordo com o pressuposto de que a maior parte da MOS presente nas TPIs é de origem pirogênica e não tanto da decomposição e migração do material vegetal.^{28,29}

3.2. Estoques de Carbono e Nitrogênio nos solos

As densidades dos solos (ρ) nas áreas P01, P02 e P05 apresentaram uma mesma tendência de crescimento com o aumento da profundidade, mas foi observado um comportamento totalmente oposto nos SNAs P03 e P04 (Tabela 2). A área P01 mostrou-se estatisticamente mais densa (p -valor $< 0,05$) em todas as profundidades quando comparada com P02, com exceção da camada 10-20 cm em que foram estatisticamente semelhantes (p -valor $> 0,05$). Embora as TPIs apresentem valores de ρ típico de solos sob florestas, pode-se deduzir que a área P01 possui uma menor

porosidade, ou maior compactação em consequência de um maior tempo de cultivo agrícola intenso, ou devido ao menor tempo de pousio que vem proporcionando um aporte menor de biomassa nova,⁸ quando comparada com a área P02.

A área P03 foi a que apresentou a maior ρ nas camadas superficiais, o que pode indicar intenso uso agrícola, solo sob pastagem ou emprego de maquinário pesado de grande porte. Por outro lado, a área P05 foi a que apresentou a maior amplitude (35,5%) e os maiores valores de ρ ao longo do perfil, variando de 1,21 a 1,64 kg dm⁻³, sugerindo maior decréscimo do desenvolvimento radicular das plantas devido ao impedimento físico. Sabe-se que solos cultivados sofrem maior compactação e consolidação natural, alterando-se os espaços porosos, o que dificulta a movimentação de água e ar.

O aumento da ρ em profundidade nas áreas de TPI, concomitante com o decréscimo de MOS está de acordo com os resultados obtidos para tais solos arqueológicos na região de Oriximiná (PA) sendo os valores aqui apresentados maiores, mas com menores amplitudes e estão de acordo também com os resultados obtidos em TPIs sob cultivo de Citrus em Manacapuru (AM).⁸ Além disso, as menores ρ nas superfícies das TPIs podem indicar que o elevado teor de MOS atenuou a compactação ocasionada pela atividade humana pré-Colombiana. Deve-se ressaltar que segundo levantamento efetuado por Sombroek *et al.*,³⁰ muitos autores não tiveram a preocupação e o esmero de determinar as densidades do solo em cada camada (pedológica ou estratigráfica) ao longo das TPIs, o que pode acarretar dúvidas e incertezas nos resultados que dependem da base mássica, como os estoques de carbono e nitrogênio.

Não foram observadas diferenças significativas para os estoques de Nitrogênio entre todas as camadas das áreas de TPI (Tabela 2), que por sua vez apresentaram estoques de Nitrogênio aproximadamente três vezes menores do que verificados em TPIs sob cultivo na Costa do Laranjal (AM).⁸ Contudo, as TPIs apresentaram concentrações entre seis a 42 vezes menores, quando comparadas (não estatisticamente) com valores típicos de SNAs, o que pode ser atribuído à perda durante o processo de queima da vegetação pelos povos pré-Colombianos. Foi encontrada diferença significativa (p -valor $< 0,05$) no estoque de carbono entre as duas áreas de TPIs apenas na camada mais superficial (0-5 cm); a área P02 ao apresentar um estoque de carbono 40% maior do que o obtido pela área P01, sugere maior recuperação da qualidade ambiental, no que tange à MOS, ocasionada pelo maior tempo de pousio ou maior acúmulo pretérito de serapilheira ou *Black Carbon*. Nas camadas restantes, embora as concentrações de C na área P02 sejam maiores, os valores mais elevados de ρ de P01 compensaram, no cômputo geral, para os cálculos dos estoques de C e N.

Os resultados demonstram que o estoque de Carbono vertical em TPIs não apresentou uma redução em profundidade típica dos solos amazônicos, como observado por Batjes e Dijkshoorn³¹ e Chagas para TPIs sob cultivo de Citrus há cinco anos.⁸ De modo geral, os valores são menores

Tabela 2. Densidade do Solo e Estoques de carbono e nitrogênio em TPIs e SNAs

Profundidade (cm)	ρ	C	N
	kg m ⁻³	Mg ha ⁻¹	
P01 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico			
0-5	1,09 ± 0,10 a	12,3 ± 3,1 a	0,5 ± 0,2 a
5-10	1,23 ± 0,06 a	9,8 ± 0,4 a	0,8 ± 0,3 a
10-20	1,17 ± 0,04 a	19,0 ± 2,7 a	1,3 ± 0,5 a
20-40	1,24 ± 0,08 a	34,0 ± 2,8 a	1,7 ± 0,8 a
40-60	1,31 ± 0,06 a	19,2 ± 1,1 a	1,8 ± 0,6 a
60-80	1,41 ± 0,09 a	21,7 ± 19,5 a	1,5 ± 1,1 a
80-100	1,49 ± 0,09 a	13,1 ± 1,6 a	1,7 ± 0,9 a
P02 - Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média, A antrópico			
0-5	0,96 ± 0,13 b	19,8 ± 4,1 b	1,1 ± 0,5 a
5-10	1,01 ± 0,10 b	10,4 ± 1,5 a	0,6 ± 0,3 a
10-20	1,12 ± 0,10 a	23,1 ± 3,1 a	1,6 ± 0,2 a
20-40	1,11 ± 0,07 b	34,4 ± 4,8 a	2,0 ± 0,4 a
40-60	1,19 ± 0,09 b	25,9 ± 2,1 b	1,8 ± 0,3 a
60-80	1,26 ± 0,10 b	15,9 ± 2,8 a	1,2 ± 0,4 a
80-100	1,24 ± 0,14 b	10,6 ± 1,0 a	0,7 ± 0,2 a
P03 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa			
0-23	1,35 ± 0,02	40,1 ± 1,4	7,8 ± 0,3
23-38	1,39 ± 0,01	20,0 ± 0,7	4,3 ± 0,3
38-50	1,39 ± 0,01	12,3 ± 0,4	2,9 ± 0,1
50-77	1,36 ± 0,01	23,4 ± 0,8	7,2 ± 0,3
77-110	1,25 ± 0,09	22,8 ± 1,0	8,0 ± 0,3
110-200	1,29 ± 0,08	35,8 ± 2,3	14,8 ± 0,5
P04 - Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico latossólico de textura média/argilosa			
0-10	1,19 ± 0,07	35,9 ± 1,0	3,7 ± 0,1
10-25	1,09 ± 0,06	22,0 ± 0,8	4,6 ± 0,2
25-70	1,07 ± 0,03	37,4 ± 1,3	9,5 ± 0,1
70-120	1,05 ± 0,04	28,1 ± 1,0	11,4 ± 0,2
120-200	1,06 ± 0,06	39,4 ± 1,4	21,4 ± 1,0
P05 - Argissolo Amarelo Distrófico plântico de textura média/argilosa			
0-30	1,21 ± 0,02	51,0 ± 1,8	7,9 ± 0,4
30-50	1,45 ± 0,16	29,0 ± 1,0	6,9 ± 0,3
50-96	1,43 ± 0,05	31,2 ± 1,1	12,4 ± 0,7
96-140	1,56 ± 0,05	28,8 ± 1,2	10,7 ± 0,4
140-200	1,64 ± 0,06	34,1 ± 2,0	17,9 ± 0,7

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 ($p < 0,05$).

nas camadas mais superficiais (0-20 cm) e maiores em subsuperfície (> 20 cm), contrariando o que seria esperado devido à influência dos microorganismos decompositores de vegetação sobre os horizontes superficiais (Tabela 3), porém estando de acordo com o observado por Kern e Kampf.³² Por outro lado, os solos SNAs apresentaram comportamento típico da Amazônia: maiores estoques na subsuperfície decrescendo abruptamente com a profundidade.

Esse estudo demonstrou que os solos, de acordo com sua pedogênese possuem capacidades diferenciadas de armazenar Carbono e Nitrogênio. As TPIs são,

potencialmente, os mais importantes reservatórios de carbono da bacia amazônica, mesmo quando contidos em áreas degradadas pela intensa atividade agrícola. Segundo Kern e Kampf,³² “O significativo acúmulo de material orgânico pelo homem pré-Colombiano em TPIs é ainda mais evidente quando se expressa pelo estoque de carbono”.

Expressando-se o estoque de Carbono para um 1 metro de profundidade, tem-se a oportunidade de avaliar melhor a capacidade superior das TPIs como um eficiente dreno de carbono (Figura 1). Enquanto os SNAs das áreas P03 e P05 praticamente mantiveram-se constantes com estoques de

C variando de 111,6 a 113,8 $\text{Mg ha}^{-1} \text{m}^{-1}$, respectivamente. As TPIs foram estatisticamente diferentes (p -valor $< 0,05$) e variaram (8,5%) com valores de 129,1 a 140,1 $\text{Mg ha}^{-1} \text{m}^{-1}$ para P01 e P02, respectivamente. As TPIs apresentam significativa capacidade de estocar Carbono para essa profundidade, apresentando valores entre 14 e 23% acima (não estatístico) aos dos SNAs desse estudo.

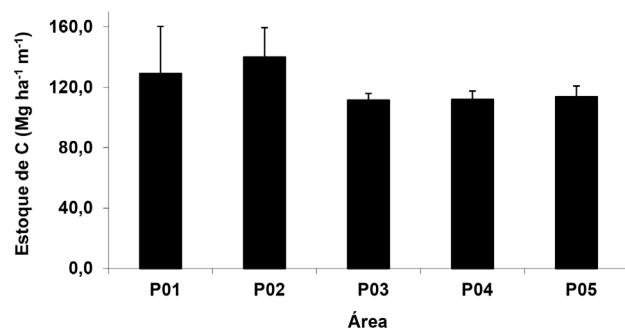


Figura 2. Estoques de carbono em TPIs e SNAs

Quando se extrapola para o valor médio de estoque de carbono da Região Amazônica, fica mais realçada a capacidade das TPIs atuarem como importantes drenos de carbono, pois as áreas P01 e P02 desse estudo possuem capacidade entre 30 e 40% acima da média regional de toda a Bacia Amazônica ($C = 100,0 \text{ Mg ha}^{-1} \text{m}^{-1}$).³⁰⁻³² Só foram menores que em dois dos 28 tipos de SNAs representativos da Amazônia, segundo extenso levantamento realizado por Batjes e Dijkshoorn³¹ e foram maiores do que em todos os 15 SNAs representativos do Brasil avaliados por Batjes.³² Além disso, os valores aqui apresentados foram entre 40 e 110% superiores aos estoques de carbono contidos em uma profundidade de 2 m em uma floresta primária, uma pastagem, uma floresta secundária e um sistema agroflorestal no estado do Amazonas e entre 30 e 105% acima dos verificados para uma profundidade de 2 m em um Latossolo,¹⁰ um Argissolo e um Espodossolo situados em uma Catena sob floresta primária em Manaus.⁹ Por outro lado, Chagas *et al.*,⁸ identificaram valores de estoques de carbono em TPIs apenas 35% inferiores aos resultados desse estudo, mas para uma profundidade total de apenas 30 cm.

O estoque de nitrogênio para um 1 metro de profundidade apresentou um comportamento totalmente diferente ao que se é esperado para solos da Região Amazônica, como pode ser observado na Figura 3. As TPIs apresentaram valores estatisticamente semelhantes (p -valor $> 0,05$) com estoques de nitrogênio variando entre 9,3 e 9,0 $\text{Mg ha}^{-1} \text{m}^{-1}$ para P01 e P02, respectivamente. Contudo, esses resultados apresentaram-se extremamente baixos quando comparados com valores de SNAs típicos da Bacia Amazônica, como pode ser observado ao se comparar (não estatisticamente) com as áreas P03, P04 e P05, que foram em média três vezes superiores às TPIs, por terem variado entre 24,6 e 28,2 $\text{Mg ha}^{-1} \text{m}^{-1}$. Ao que tudo indica, a natureza prioritariamente pirogênica da MOS nas TPIs favorece o estoque de carbono nessas áreas, mas não o estoque de nitrogênio.

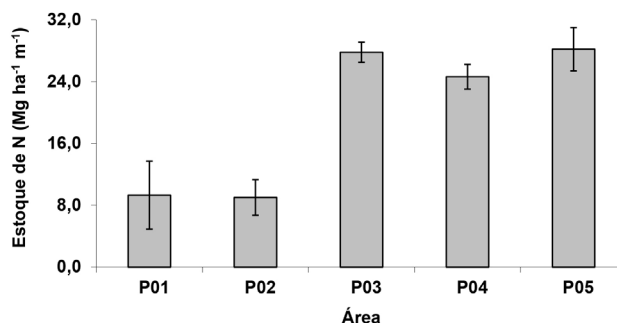


Figura 3. Estoques de nitrogênio em TPIs e SNAs

Ao contrário desse estudo, Chagas *et al.*,⁸ identificaram que as TPIs sob cultivo de Citrus eram capazes de estocar, em média, 5,82 Mg N ha^{-1} na profundidade total de 30 centímetros o que corresponderia à quase 26% acima do valor apresentado para a soma das camadas de 0 a 40 cm nesse estudo para a área P01 e 7% superior em igual camada em P02.

4. Conclusão

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam que as Terras Pretas de Índio (TPIs) analisadas apresentam grande capacidade de estocagem de carbono, superando os Solos Não Antrópicos (SNAs) típicos da Bacia Amazônica em até 40%, inclusive em profundidades superiores a 1 metro. A comparação entre as áreas de TPI revelou que um maior tempo de pousio (20 anos em P02, em relação a 10 anos em P01) está associado a um aumento de 8,5% nos estoques de carbono, o que indica a eficácia dos processos naturais de regeneração na melhoria da qualidade edáfica e da retenção de matéria orgânica em ambientes antropizados.

Adicionalmente, as TPIs se destacaram por manter estoques expressivos de carbono mesmo em camadas subsuperficiais, comportamento pouco comum em solos tropicais e indicativo da estabilidade da matéria orgânica pirogênica presente. Por outro lado, os estoques de nitrogênio nas TPIs foram consideravelmente inferiores aos observados nos SNAs, o que reforça a hipótese de que a origem pirogênica da MOS, embora favoreça a retenção de carbono, não apresenta o mesmo desempenho na retenção de nitrogênio.

Esses resultados corroboram a importância das TPIs não apenas como reservatórios naturais de carbono no contexto das mudanças climáticas, mas também como modelos edáficos potenciais para o desenvolvimento de tecnologias agrícolas baseadas no conhecimento tradicional, com vistas à mitigação dos impactos do Antropoceno. A preservação e o estudo aprofundado dessas formações arqueológicas oferecem subsídios valiosos para estratégias de uso e manejo sustentável do solo na Amazônia, com implicações diretas para a segurança alimentar, conservação da biodiversidade e formulação de políticas públicas voltadas à descarbonização dos sistemas produtivos.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências Bibliográficas

1. Silva, C. M.; Arbilla, G.; Antropoceno: Os Desafios de um Novo Mundo. *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1619. [CrossRef]
2. Silva, C. M.; Arbilla, G.; Machado, W.; Soares, R.; A Nova Idade Meghalayan: O que isso Significa para a Época do Antropoceno? *Revista Virtual de Química* **2018**, *10*, 1619. [CrossRef]
3. Silva, C. M.; Arbilla, G.; Machado, W.; Soares, R.; Radionuclídeos como marcadores de um novo tempo: o Antropoceno. *Química Nova* **2020**, *43*, 506. [CrossRef]
4. McNeill, J. R.; The Great Acceleration: An Environmental History of the Anthropocene since 1945, Cambridge: Harvard University Press, 2016.
5. Arêas, J. S.; Cunha, C. E. S. C. P.; Santelli, R. E.; Machado, W.; Bielschowsky, C.; Rocha, R. T.; Soares, R.; Seriam as Áreas Contaminadas do Estado do Rio de Janeiro um Legado da Grande Aceleração no Antropoceno? *Revista Virtual de Química* **2020**, *12*, 775. [CrossRef]
6. Silva, C. M.; Soares, R.; Machado, W.; Arbilla, G.; A Pandemia de COVID-19: Vivendo no Antropoceno. *Revista Virtual de Química* **2020**, *12*, 1001. [CrossRef]
7. Soares, R.; Mello, M. C.; S.; Silva, C. M.; Machado, W.; Arbilla, G.; Online Chemistry Education Challenges for Rio de Janeiro Students during the COVID-19 Pandemic. *Journal of Chemical Education* **2020**, *9*, 3396. [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. 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]
10. Marques, J. D. de O.; Luizão, F. J.; Teixeira, W. G.; Sarrazin, M.; Filgueira 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]
11. 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]
12. Marris, E.; Black is the new green. *Nature* **2006**, *442*, 626. [CrossRef]
13. 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]
14. Madari, B. E.; Benites, V. M.; Cunha, T. J. F.; The effect of management on the fertility of Amazonian anthropogenic dark earth soils. Em Amazonian Dark Earths, Lehmann, J.; Kern, D. C.; Glaser, B.; Woods, W.; eds., Springer: Dordrecht, 2003, cap. 21.
15. 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]
16. 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]
17. 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]
18. Teixeira, P. C.; Donagemma, G. K.; Fontana, A.; Teixeira, W. G.; *Manual de métodos de análise de solo*, 3ª ed., EMBRAPA, Brasília – DF, 2017. [Link]
19. Kern, D. C.; Costa, M. L.; Composição química de solos antropogênicos desenvolvidos em Latossolo Amarelo derivados de lateritos. *Geociências* **1997**, *16*, 157. [Link]
20. Kern, D. C. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Pará, 1996. [Link]
21. 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]
22. 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]
23. Liang, B.; Lehman, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O’Neill, B.; Skjemstad, J. O.; Thies, J.; Luizão, F. J.; Petersen, J.; Neves, E. G.; Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal* **2006**, *70*, 1719. [CrossRef]
24. Kampf, N.; Kern, D. C.; Classification of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. Em Amazonian Dark Earths, Lehmann, J.; Kern, D. C.; Glaser, B.; Woods, W.; eds., Springer: Dordrecht, 2003, cap. 5.
25. Lehmann, J.; Gaunt, J.; Rondon, M.; Bio-Char Sequestration in Terrestrial Ecosystems – a Review. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **2006**, *11*, 403. [CrossRef]
26. Lehmann, J.; Silva, Jr.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B.; Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil* **2003**, *249*, 343. [CrossRef]
27. Hughes, R. F.; Kauffman, J. B.; Cummings, D. L.; Dynamics of Aboveground and Soil Carbon and Nitrogen Stocks and Cycling of Available Nitrogen along a Land-use Gradient in Rondônia, Brazil. *Ecosystems* **2002**, *5*, 244. [CrossRef]

28. Glaser, B.; Haumaier, L.; Guggenberger, G.; Zech, W.; Black carbon in soils: The use of benzenecarboxylic acids as specific markers. *Organic Geochemistry* **1998**, 29, 811. [[CrossRef](#)]
29. Glaser, B.; Guggenberger, G.; Haumaier, L. Zech, W.; Persistence of soil organic matter in archaeological soils (terra preta) of the Brazilian Amazon region. Em Sustainable Management of Soil Organic Matter, Rees, R. M.; Ball, B. C.; Campbell, C. D.; Watson, C.A.; eds., p.190-194, Publishing: Wallingford CABI, 2001, cap. 3.
30. Sombroek, W. G; Ruivo, M. D. L.; Fearnside, P. M.; Glaser, B.; Lehmann, J.; Amazonian Dark Earths as Carbon Stores and Sinks. Em Amazonian Dark Earths, Lehmann, J; Kern, D. C.; Glaser, B.; Woods, W.; eds., Springer: Dordrecht, 2003, cap. 7.
31. Batjes, N. H.; Dijkshoorn, J. A. Carbon and nitrogen stocks in the soils of the Amazon Region. *Geoderma* **1999**, 89, 273. [[CrossRef](#)].
32. Batjes, N. H.; Organic carbon stocks in the soils of Brazil. *Soil Use and Management* **2005**, 21, 22. [[CrossRef](#)]