



ARTIGO ORIGINAL

Katiane Raquel Mendes Barros¹
Herdjania Veras Lima^{1*}
Luciano Pasqualoto Canellas²
Dirse Clara Kern³

¹Universidade Federal Rural da Amazônia – UFRA,
Av. Presidente Tancredo Neves, 2501,
66077-530, Belém, PA, Brasil

²Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy
Ribeiro – UENF, Av. Alberto Lamego, 2000,
28013-602, Parque Califórnia,
Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

³Museu Paraense Emílio Goeldi – MPEG,
Av. Perimetral, 1901, CP 399,
66077-530, Belém, PA, Brasil

Autor correspondente:

*E-mail: herdjania.lima@ufra.edu.br

PALAVRAS-CHAVE

Propriedades físicas
Solos antrópicos
Substâncias húmicas

KEYWORDS

Physical properties
Anthropogenic soils
Humic substances

Fracionamento químico da matéria orgânica e caracterização física de Terra Preta de Índio

Chemical fractionation of organic matter and physical characterization of amazonian dark earth

RESUMO: Solos antropogênicos denominados Terra Preta de Índio (TPI) caracterizam-se por apresentar alto conteúdo de matéria orgânica e alta fertilidade, mas as suas características físicas são pouco conhecidas. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento físico-hídrico e o fracionamento químico da matéria orgânica em Terra Preta de Índio, no Estado do Pará. Para tanto, foram escolhidas três áreas localizadas no município de Melgaço: 1) Sítio Mina I, sob floresta secundária; 2) Sítio Mina II, sob vegetação secundária, e 3) Sítio Manduquinha, sob vegetação secundária. Essas áreas são classificadas como Latossolo Amarelo antropogênico, nas quais foram realizadas análises químicas para caracterização da fertilidade e fracionamento da matéria orgânica. A caracterização física foi determinada por meio dos seguintes aspectos: textura do solo; determinação da curva de retenção de água no solo; água disponível; distribuição do espaço poroso; curva de resistência à penetração (RP), e densidade do solo (Ds). As análises químicas comprovaram a alta fertilidade dos solos TPI em Caxiuanã. Com relação às frações húmicas, observou-se maior conteúdo de humina e ácido húmico, e menor de ácido fúlvico. As análises físicas indicaram que as TPIs possuem textura variando de franco arenosa a franco argilo arenosa, e baixa Ds, com maior água disponível tendo sido verificada no sítio Mina II. Das três áreas estudadas, os sítios Mina II e Manduquinha apresentaram valores de RP acima de 2,5 MPa; no entanto, neste, a maior RP juntamente com o menor teor de água disponível tendem a limitar o crescimento das plantas.

ABSTRACT: The anthropogenic soil called 'Terra Preta de Índio' - Amazonian Dark Earth ('TPI', from Portuguese) is characterized by its high content of organic matter and fertility, but its physical characteristics are unknown. Thus, the purpose of this study was to analyze the physical-hydric behavior and chemical fractionation of organic matter in 'Terra Preta de Índio' - Amazonian Dark Earth, in the State of Para. To this end, three areas were selected in the municipality of Melgaço: 1) 'Sítio Mina I', secondary forest; 2) 'Sítio Mina II', secondary vegetation; and 3) 'Sítio Manduquinha', secondary vegetation, classified as anthropogenic Oxisol, where the chemical analyzes were performed to characterize fertility and organic matter fractionation. The physical characterization was determined by soil texture, determination of soil water retention curve, available water capacity, distribution of pore space, curve of penetration resistance (PR) and bulk density (BD). Chemical analysis proved the high fertility of 'TPI' soil in Caxiuanã. Regarding the humic fractions, it was possible to observe higher contents of humin and humic acids and lower content of fulvic acid. Physical analysis indicated that 'TPI' present texture ranging from sandy loam to sandy clay loam, low BD, with more water available found in 'Sítio Mina II'. Of the three areas studied, 'Sítio Mina II' and 'Sítio Manduquinha' showed PR values above 2.5 MPa; however, the highest PR value with the lowest available water content tend to limit plant growth.

Recebido: 13/02/2012
Aceito: 03/05/2012

1 Introdução

A Terra Preta do Índio (TPI) é caracterizada pela presença de um horizonte A antrópico constituído por fragmentos cerâmicos e artefatos líticos indígenas de origem pré-colombiana (LIMA et al., 2002; GLASER; BIRK, 2012), e pode ser encontrada em várias classes de solo, como Latossolo, Argissolo, Luvisso, Neossolo e Cambissolo (SMITH, 1980). As TPIs apresentam elevados níveis de nutrientes, como cálcio, magnésio, zinco e principalmente fósforo (GLASER; BIRK, 2012), além de altos níveis de matéria orgânica (MO), chegando a apresentar três vezes mais MO do que os solos adjacentes (GLASER, 2007).

Os solos de terra preta normalmente localizam-se em áreas próximas a cursos de água, em elevações marginais, áreas de várzea, de terra firme, ocupando cerca de um hectare, porém essa dimensão pode chegar a centenas de hectares (ha) quando estão localizados ao longo dos rios (SMITH, 1980). O tamanho de cada sítio varia de acordo com sua localização, sendo que aqueles localizados em terra firme podem variar de 0,3 a 5 ha. Smith (1980), em seu estudo ao longo dos rios Xingu (PA), Tapajós (PA), Amazonas (região de Manaus e Itacoatiara, AM) e rio Negro (AM), observou que o tamanho dos sítios variava de 0,4 a 90,0 ha.

A manutenção da fertilidade do solo de TPI é atribuída à quantidade e à qualidade da matéria orgânica (MADARI et al., 2009), a qual é considerada mais estável em razão da estabilização com complexos organominerais (GLASER et al., 2003) e também pela alta reatividade das frações húmicas (CUNHA et al., 2007).

Do ponto de vista das propriedades físicas, sabe-se que as TPIs apresentam horizonte A antrópico mais arenoso do que sua área adjacente, fato atribuído à ocupação antrópica (SMITH, 1980), em que o intenso uso do fogo associado à deposição de material orgânico forma partículas organominerais estáveis semelhantes às da fração areia (TEIXEIRA et al., 2009). Os solos antropogênicos são solos bem drenados, com densidade do solo baixa, fato que se dá, possivelmente, pelos efeitos advindos da matéria orgânica sobre a atenuação das consequências da ocupação humana (KERN; KAMPF, 1989).

Os estudos sobre o comportamento físico das TPIs ainda são pouco difundidos, sendo necessário o avanço de pesquisas que mostrem sua qualidade física, a fim de auxiliar na adoção de práticas alternativas de uso e manejo dos solos altamente intemperizados, atuando como uma importante ferramenta para a sustentabilidade da agricultura.

Nesse contexto, o objetivo foi estudar o comportamento físico-hídrico e o fracionamento químico da matéria orgânica em Terra Preta de Índio, no Estado do Pará.

2 Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido no município de Melgaço, Estado do Pará, na Floresta Nacional de Caxiuanã, onde três sítios arqueológicos foram amostrados: 1) Sítio Mina I, localizado em uma floresta secundária de, aproximadamente, 25 anos; 2) Sítio Mina II, apresenta cobertura vegetal constituída por vegetação secundária (capoeira) de 30 anos, e 3) Sítio Manduquinha, que corresponde a uma vegetação secundária

que ocupa uma área de 0,5 ha. Kern (1996) classificou esses solos como Latossolo Amarelo antropogênico.

Em cada sítio, 15 amostras de solo com estrutura deformada e 15 amostras indeformadas foram coletadas na camada superficial (2-10 cm de profundidade). Para as análises químicas e granulométricas, as amostras deformadas foram secas ao ar, destorroadas e peneiradas em malha de 2 mm, caracterizando Terra Fina Seca ao Ar (TFSA). A granulometria foi realizada segundo o método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986), cujas amostras foram submetidas ao pré-tratamento com peróxido de hidrogênio (H_2O_2) para remoção da matéria orgânica.

As amostras indeformadas, coletadas em anéis volumétricos (0,05 m de altura \times 0,05 m de diâmetro), foram saturadas e submetidas aos seguintes potenciais: -0,001; -0,002; -0,003; -0,004; -0,005; -0,006; -0,007; -0,008; -0,009; -0,01 MPa em mesa de tensão; -0,025; -0,05; -0,1; -0,3; -1,5 MPa em panela de pressão com placa porosa (KLUTE, 1986), até atingir o ponto de equilíbrio por meio do cessamento da drenagem de água. A partir dos valores obtidos de umidade do solo, procedeu-se o ajuste não linear à Equação de van Genuchten (1980) (Equação 1):

$$\theta_g = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[(1 + \alpha\psi)^n]^m} \quad (1)$$

Em que: θ_g = umidade gravimétrica do solo ($g\ g^{-1}$); θ_r = umidade gravimétrica residual ($g\ g^{-1}$); θ_s = umidade gravimétrica de saturação ($g\ g^{-1}$); ψ = potencial mátrico (MPa); α , m , n = parâmetros empíricos do modelo.

O valor de água disponível no solo (AD) foi estimado por meio da diferença entre a umidade na capacidade de campo (θ_{cc}), considerando o potencial de -0,01 MPa e a umidade no ponto de murcha permanente (θ_{pmp}) a -1,5 MPa. A distribuição de diâmetros de poros foi obtida a partir dos dados da curva de retenção de água.

Para a determinação da resistência do solo à penetração de raízes (RP), as amostras de solo foram divididas em cinco grupos com três repetições e submetidas aos potenciais: -0,003; -0,03; -0,1; -0,3; -1,5 MPa. Após atingir o equilíbrio, cada amostra foi medida a RP por meio de um penetrômetro eletrônico descrito por Tormena, Silva e Libardi (1998). Em seguida, as amostras foram levadas à estufa a 105 °C por 24 h e foi determinada a densidade do solo (Ds) (BLAKE; HARTGE, 1986).

Os dados de RP foram ajustados em relação à umidade gravimétrica (θ_g) utilizando-se o modelo não linear proposto por Busscher et al. (1997). Os coeficientes a e b são os parâmetros do modelo obtidos mediante ajuste, por meio da Equação 2:

$$RP = a\theta_g^b \quad (2)$$

As análises químicas foram determinadas segundo a metodologia da EMBRAPA (1997) e constaram das seguintes determinações: pH em água e em KCl 1N na proporção de 1:2,5; acidez potencial ($H^+ + Al^{+3}$) extraída com acetato de cálcio 1N a pH 7,0; Ca, Mg e Al trocáveis extraídos com KCl 1 mol L^{-1} ; K e P extraídos com Mehlich 1 e determinados por fotometria de chama e por colorimetria, respectivamente.

O fracionamento químico da matéria orgânica foi realizado conforme descrito pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas – IHSS (SWIFT, 1996), com modificações propostas por Benites, Madari e Machado (2003), sendo então obtidas as frações de ácido fúlvico (AF), ácido húmico (AH) e humina (H), e o teor de carbono orgânico de cada fração, conforme segue: foi pesado 1,5 g de amostras de solo, em triplicata; em seguida, as amostras foram submetidas ao pré-tratamento com HCl 0,1 mol L⁻¹ e uso de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como solvente, sendo agitadas e centrifugadas por 10 min a 3000 rpm. Esse procedimento foi repetido por mais seis vezes. O pH do extrato alcalino foi ajustado para 1,5 pela adição de H₂SO₄ e deixado para decantar. O material acidificado foi centrifugado e foi separado o sobrenadante (fração de ácido fúlvico). Sobre o precipitado, foi adicionado NaOH 0,1 mol L⁻¹ correspondente à fração ácidos húmicos. O material restante nos tubos da centrífuga foi considerado como a fração humina.

A determinação quantitativa do carbono orgânico total (COT) e do carbono nos extratos das frações ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e humina foi feita por meio da oxidação do carbono com dicromato de potássio e titulação do excesso, com sulfato ferroso amoniacal 0,4 mol L⁻¹. A partir dos dados de COT, foi determinado o conteúdo de matéria orgânica, multiplicando-se por 1,724.

Os parâmetros do ajuste do modelo da curva de retenção de água no solo e das curvas de resistência do solo à penetração foram submetidos à análise de variância (teste F) no nível de significância ($p < 0,05$).

3 Resultados e Discussão

A classe textural dos sítios de TPI estudados variou de franco arenosa (123 g kg⁻¹ de argila) a franco argilo arenosa (214 g kg⁻¹ de argila) (Tabela 1), mostrando que apesar da maior quantidade da fração areia, ocorre uma grande variação textural entre as TPIs, o que dificulta a comparação

Tabela 1. Análise granulométrica da camada superficial (2-10 cm de profundidade) dos sítios de Terra Preta de Índio, localizados no município de Melgaço, Estado do Pará.

Frações	N	Média	Máximo	Mínimo	Desvio padrão	Classe textural
		g kg ⁻¹				
Mina I						
Areia	15	454	545	386	52	Franca
Silte	15	394	475	312	53	
Argila	15	153	185	131	13	
Mina II						
Areia	15	737	804	676	33	Franco Arenosa
Silte	15	140	239	87	35	
Argila	15	123	148	74	20	
Manduquinha						
Areia	15	539	619	487	39	Franco
Silte	15	247	314	189	36	Argilo
Argila	15	214	285	85	50	Arenosa

N: número de repetições.

de valores e a classificação da TPI como uma classe de solo (TEIXEIRA et al., 2009).

A maior concentração de areia entre as frações granulométricas é uma característica comum das TPIs (SMITH, 1980), que pode ser atribuída à formação de material organomineral estável de tamanho equivalente à areia, o qual resulta da combinação da prática do uso do fogo e do depósito de material orgânico pelos ameríndios que ocupavam essas localidades (TEIXEIRA et al., 2009).

Ao analisar os parâmetros de ajuste da curva de retenção do sítio Mina I, observou-se que, na condição de solo saturado, apresentou-se o menor valor de umidade ($\theta_{sat}=0,36$ g g⁻¹), no entanto, a -0,01 MPa, condição de capacidade de campo, foi observado maior conteúdo de água ($\theta_g = 0,31$ g g⁻¹) (Figura 1, Tabela 2), podendo este ser relacionado ao efeito da MO (Tabela 6) neste ponto da curva, concordando com as observações feitas por Rawls et al. (2003), segundo os quais a água é retida por forças capilares e que estas dependem da distribuição dos tamanhos dos poros. Desse modo, a MO atua reduzindo o tamanho dos poros, favorecendo a retenção de água no solo (MAIA; MORAIS; MEDEIROS, 2005).

O sítio Manduquinha, no ponto de murcha permanente (PMP) ($\psi = -1,5$ MPa), obteve maior retenção de água (Tabela 2), caracterizando elevado conteúdo de água indisponível (KLEIN; LIBARDI, 2002). Para esse potencial matricial, a retenção de água no solo é influenciada pela mineralogia, pela composição granulométrica e pelo teor de matéria orgânica (HILLEL, 1998). Logo, o comportamento da área pode estar relacionado ao maior conteúdo de argila e matéria orgânica observado (Tabelas 1, 6).

Teores mais elevados de água no PMP foram observados por Neves Junior (2008) em solos de Terra Preta de Índio, quando comparados com suas respectivas áreas adjacentes, fato este associado à contribuição do carbono presente nos solos antropogênicos. Para Teixeira et al. (2009), a distribuição

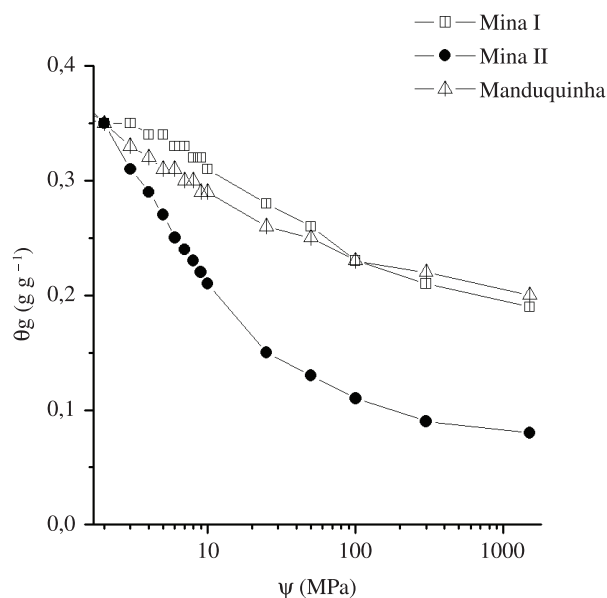


Figura 1. Curvas de retenção de água no solo para os sítios de Terra Preta de Índio Mina I, Mina II e Manduquinha.

granulométrica das TPIs exerce maior influência sobre a retenção de água do que o alto teor de carbono orgânico, pelo fato de a maior retenção ocorrer em horizontes mais profundos em virtude da maior quantidade de argila, superando os efeitos do carbono nos horizontes antrópicos que, por sua vez, são mais arenosos.

Os valores médios da PT estão acima do limite proposto por Brady e Weil (2008) de $0,5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, considerado satisfatório para o crescimento adequado das plantas (Tabela 3). As áreas estudadas apresentaram valor de macroporos superior a $10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, conforme a tabela a seguir; esse valor é considerado limite inferior para a adequada difusão de oxigênio, demonstrando que se garante, então, uma boa aeração para o desenvolvimento de raízes.

De acordo com a distribuição do tamanho de poros, houve predomínio do volume de microporos nas áreas estudadas, representando cerca de 70, 63 e 69% dos poros totais nos sítios Mina I, Mina II e Manduquinha, respectivamente (Tabela 3). O aumento de microporos associados à redução da macroporosidade pode ser indicativo da ação da matéria orgânica dos solos de TPI, responsável pelo aumento dos microporos, por reduzir os espaços ocupados pelos poros maiores.

O valor de Ds foi maior no sítio Mina II ($1,27 \text{ g cm}^{-3}$) e menor no Mina I ($1,19 \text{ g cm}^{-3}$), no entanto, de uma maneira geral, considerando-se a distribuição granulométrica dos solos, os sítios de TPIs apresentaram valores de Ds reduzidos (Tabela 3). Kern e Kampf (1989) associam os menores valores dessa variável ao alto conteúdo de matéria orgânica encontrada nos solos de TPI, o que, segundo os autores, favoreceu a redução da compactação decorrente do pisoteio dos povos indígenas que habitavam essas localidades.

A resistência à penetração foi significativamente influenciada pela umidade do solo ($p\text{-valor} < 0,05$), ocorrendo uma relação negativa entre as variáveis. O modelo de Busscher et al. (1997) explicou acima de 63% a variabilidade da RP no sítio Mina I, 65% no Mina II e acima de 88% no sítio Manduquinha (Tabela 4).

Observa-se que, com o secamento do solo, ocorre elevação da RP, com maior magnitude para o sítio Mina II (Figura 2), podendo esse fato estar associado à influência da textura do

solo, em que há o predomínio da fração areia (Tabela 1); tal predomínio resulta na menor retenção de água no solo, refletindo, portanto, na RP. Esse comportamento também pode ser em razão do menor teor de carbono orgânico total dessa área (Tabela 6).

Considerando-se o valor limitante de RP de 2,5 MPa, conforme Taylor e Burnett (1964), verificou-se que, entre os sítios de TPI amostrados, apenas o sítio Mina I não apresentou valores de RP acima deste mesmo quando o conteúdo de água é limitante, demonstrando a boa qualidade física desse solo. No sítio Manduquinha, foram observados valores de RP restritivos ao crescimento radicular (RP = 2,5 MPa) em umidade do solo em torno de $0,2 \text{ g g}^{-1}$ de água.

A redução do conteúdo de água no solo promove o aumento da coesão entre as partículas minerais, tornando-as mais difíceis de ser separadas por forças externas, o que resulta no aumento da RP (SILVEIRA et al., 2010). O maior teor de argila e de matéria orgânica observado no sítio Manduquinha possivelmente explica a obtenção de valores de RP acima de 2,5 MPa quando o solo ainda estava com elevado conteúdo de água, pois a interação entre as variáveis pode dificultar a percepção da contribuição favorável da MO sobre a RP ou da maior agregação entre as partículas ocasionada pela fração argila do solo (BRADY; WEIL, 2008). A elevação da RP nesse sítio possivelmente explica o baixo conteúdo de água disponível observado (Tabela 3), gerando limitações ao crescimento de plantas.

Com relação à caracterização química das TPIs, observa-se que a acidez ativa do solo (pH em H_2O) revelou que os sítios amostrados apresentaram acidez na faixa considerada baixa, de 5,2 a 6,4, segundo Falcão et al. (2009), ao contrário da maioria dos Latossolos e Argissolos que, em condições naturais, apresentam pH em torno de 4 (GLASER; BIRK, 2012). Note-se que o elevado valor de pH resultou em baixo teor de Al^{3+} . Silva et al. (2011) encontraram valores de pH variando de 5,1 a 6,4 em cinco solos de sítios arqueológicos no Amazonas. O pH em KCl foi inferior ao pH em água, havendo o predomínio de carga superficial líquida negativa (Tabela 5).

Os teores de P assimilável variaram de 34,33 a 242,34 mg dm^{-3} para os sítios Manduquinha e Mina II, respectivamente (Tabela 5). Esses valores podem ser

Tabela 2. Coeficientes de ajuste da curva de retenção de água do solo em três sítios de Terra Preta de Índio.

Sítio	$\theta_{\text{sat}} (\text{g g}^{-1})$	$\theta_{\text{res}} (\text{g g}^{-1})$	α	n	m	R^2
Mina I	0,36	0,15	0,02	1,34	0,25	0,78
Mina II	0,43	0,07	0,05	1,58	0,37	0,92
Manduquinha	0,42	0,18	0,12	1,31	0,23	0,97

θ_{sat} : umidade de saturação; θ_{res} : umidade residual; α , n e m : parâmetros do modelo.

Tabela 3. Valores médios dos teores de água disponível (AD), porosidade e densidade do solo (Ds) dos sítios de Terra Preta de Índio.

Sítio	AD	Porosidade total	Macroporos	Microporos	Ds
	$\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$				g cm^{-3}
Mina I	0,13	0,54	0,16	0,38	1,19
Mina II	0,13	0,50	0,19	0,31	1,27
Manduquinha	0,09	0,53	0,15	0,37	1,20

considerados baixos quando comparados com o Latossolo Amarelo Antrópico estudado por Lima et al. (2002), no município de Iraduba-AM, com 1991 mg dm^{-3} de P para o horizonte A1 (0-30 cm). Em contrapartida, é um teor elevado em comparação ao Latossolo Amarelo da área adjacente estudado pelo autor, que apresentou o valor de 1 mg dm^{-3} .

Em sítios arqueológicos no Amazonas, Cunha et al. (2009) encontraram valor de P de 116 mg kg^{-1} em áreas de TPI sob floresta, $290,5 \text{ mg kg}^{-1}$ em TPI cultivada e $4,7 \text{ mg kg}^{-1}$ em áreas não antropogênicas. A incorporação de resíduos orgânicos, especialmente espinhas de peixe, carapaças de quelônios, ossos de animais ou mesmo de seres humanos, ricos em P, contribuiu para o elevado teor de P nas TPIs (SMITH, 1980; LIMA et al., 2002).

O teor de K^+ foi baixo para todos os sítios de TPI estudados, sendo o maior valor ($0,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) para o sítio

Manduquinha (Tabela 5). Falcão e Borges (2006) também encontraram valores reduzidos de K^+ em Terras Pretas no município de Iraduba-AM, onde a TP adubada apresentou valor de $0,19 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, enquanto na área não adubada foi de $0,12 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Nos sítios de TPI amostrados, os teores de Ca^{2+} foram superiores aos de Mg^{2+} , podendo tal fato dever-se à incorporação de ossos ricos em cálcio pelos povos pré-colombianos ou pela maior afinidade do Ca^{2+} pelas superfícies de troca, resultando em sua menor lixiviação.

Foi possível observar que os valores mais elevados de COT foram encontrados no sítio Manduquinha e os mais baixos, no sítio Mina II, alcançando valores, respectivamente, de $14,96 \text{ g kg}^{-1}$ e $12,90 \text{ g kg}^{-1}$, com os teores de matéria orgânica de $25,79 \text{ g kg}^{-1}$ e $22,24 \text{ g kg}^{-1}$ (Tabela 6). Em pesquisa realizada por Costa et al. (2009), foram observados no sítio Manduquinha teores de MO de $40,9 \text{ g kg}^{-1}$, demonstrando que as TPIs não são homogêneas quanto à fertilidade, havendo variações nas propriedades em TPIs de mesma região e inclusive dentro de uma mesma mancha (LEHMANN et al., 2003).

A humina é a fração que contém a maior parte do carbono orgânico do solo, destacando-se o sítio Mina I com maior valor médio ($8,48 \text{ g kg}^{-1}$). Nota-se que a fração insolúvel (H) da matéria orgânica corresponde entre 43 e 59% do carbono orgânico total presente na superfície dos solos (Tabela 6).

Miranda, Canellas e Nascimento (2007), estudando a distribuição das frações húmicas e as características químicas e espectroscópicas dos ácidos húmicos em fragmentos de mata nativa e de plantios abandonados de eucalipto de diferentes idades, também observaram maior teor da fração humina, representando entre 21 e 29% e 17 e 27% do carbono

Tabela 4. Parâmetros de ajuste da resistência à penetração (a e b) das áreas amostradas com o seu respectivo valor de significância (*p*-valor) e do coeficiente de determinação (R^2).

Sítio	Parâmetros		R^2
	a	b	
Mina I	0,24 (0,01)*	-1,26 (0,00)	0,63
Mina II	0,27 (0,01)	-0,91 (0,00)	0,65
Manduquinha	0,14 (0,00)	-1,79 (0,00)	0,88

*Valores entre parênteses representam a significância *p*-valor < 0,05 pelo teste F.

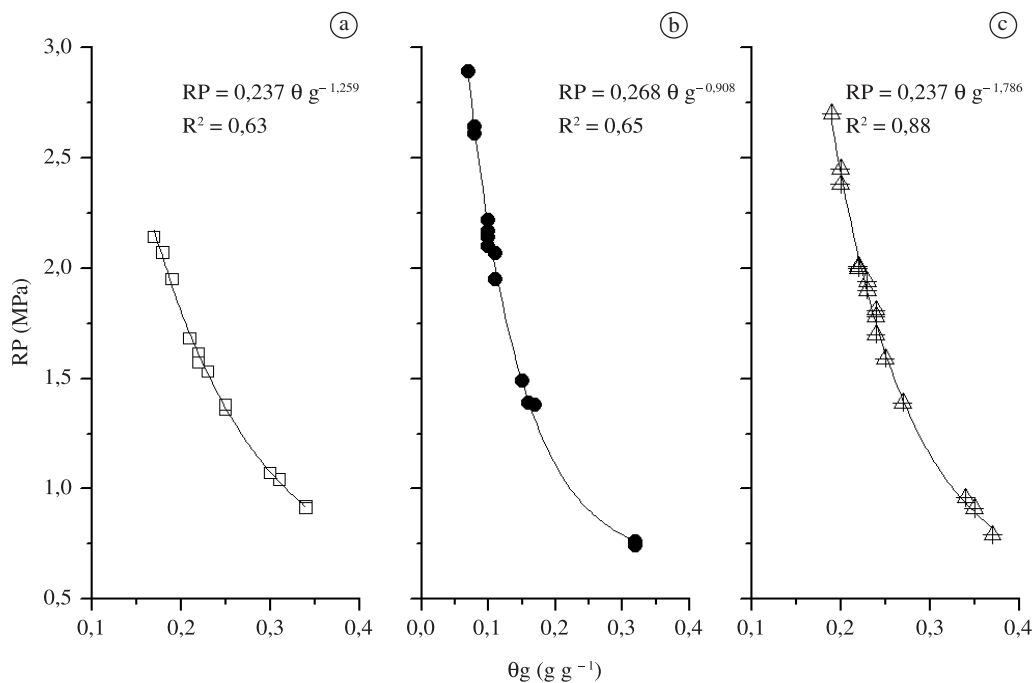


Figura 2. Variação da resistência à penetração (RP) em função do conteúdo gravimétrico de água no solo (θ_g) para os sítios de Terra Preta de Índio Mina I (a), Mina II (b) e Manduquinha (c).

Tabela 5. Características químicas das áreas estudadas localizadas no município Melgaço, Estado do Pará.

Sítio	pH		P mg dm ⁻³	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺ cmol _c dm ⁻³	Al ³⁺	H + Al
	H ₂ O	KCl						
Mina I	5,73	5,03	183,33	0,09	10,18	0,53	0,10	4,40
Máximo	6,11	5,39	337,33	0,23	11,68	0,99	0,10	7,02
Mínimo	5,36	4,08	61,23	0,06	8,72	0,18	0,10	2,93
CV* (%)	4,53	7,20	46,62	49,75	9,12	46,98	0,00	25,09
Mina II	6,51	5,90	242,34	0,10	9,30	0,48	0,10	1,90
Máximo	7,35	6,69	637,74	0,18	12,67	0,72	0,10	3,86
Mínimo	5,66	4,93	50,46	0,06	6,20	0,27	0,10	0,35
CV (%)	7,83	8,68	63,44	32,39	19,51	32,71	0,00	59,11
Manduquinha	5,35	4,71	34,33	0,12	9,00	1,62	0,24	6,33
Máximo	6,22	5,64	69,64	0,16	11,32	2,07	0,70	12,99
Mínimo	4,50	3,94	15,79	0,08	6,38	1,26	0,10	2,81
CV (%)	9,27	11,12	47,23	17,55	14,13	17,30	81,90	46,09

*CV: coeficiente de variação.

Tabela 6. Valores médios do carbono orgânico total, teor de matéria orgânica (MO), carbono nas frações das substâncias húmicas (SH), teores relativos das SH em relação ao carbono total e a relação entre as frações, agrupados por áreas de coleta, Estado do Pará.

Sítio	Carbono Total	MO	AH	AF	H	AH	AF	H	AH/AF
		g kg ⁻¹				%			
Mina I	14,43	24,87	2,85	2,03	8,48	20	14	59	1,59
Mínimo	13,74	23,69	2,63	1,17	8,18	19	9	55	0,94
Máximo	14,89	25,66	3,13	2,97	9,10	21	20	65	2,24
CV* (%)	4,20	4,20	9,04	44,34	6,27	7,25	41,12	6,15	40,92
Mina II	12,90	22,24	1,13	1,98	5,49	9	15	43	0,59
Mínimo	12,67	21,84	1,08	1,49	5,41	8	12	41	0,52
Máximo	13,13	22,63	1,16	2,23	5,64	9	18	44	0,73
CV (%)	1,79	1,79	3,94	21,68	2,42	4,36	21,79	2,98	20,42
Manduquinha	14,96	25,79	3,48	2,07	7,95	23	14	53	1,84
Mínimo	14,66	25,27	3,40	1,48	7,72	23	10	50	1,15
Máximo	15,34	26,45	3,56	2,97	8,41	24	20	57	2,41
CV (%)	2,34	2,34	2,22	38,25	5,02	2,62	40,09	6,99	34,76

MO: matéria orgânica; AH: ácido húmico; AF: ácido fúlvico; H: humina; *CV: coeficiente de variação.

total presente a 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, respectivamente.

Em solos antropogênicos estudados por Cunha et al. (2009), a fração H correspondeu à maior parte do carbono das substâncias húmicas, representando 43 e 45% do carbono orgânico total, enquanto que os solos sem horizonte A antrópico apresentaram 49%.

Mediante os critérios de interpretação dos dados de fracionamento de MO, adaptados da proposta de Dabin por Canellas et al. (2003), a percentagem de carbono na fração humina em relação ao COT inferior a 45% sugere a presença de húmus pouco evoluído, ou seja, de fraca humificação, comum em ambientes com forte limitação à atividade dos microrganismos. Esse comportamento foi verificado no sítio Mina II, apresentando a percentagem de 43% (Tabela 6).

O conteúdo de carbono na fração de AH variou de 1,13 a 3,48 g kg⁻¹ e a fração AF oscilou de 1,98 a 2,07 g kg⁻¹ nos sítios

Mina II e Manduquinha, respectivamente. Nos sítios Mina I e Manduquinha, foram observados valores mais elevados para AH quando comparados com os AF e ainda maior razão AH/AF (1,59 e 1,84, respectivamente) (Tabela 6).

A razão AH/AF é utilizada como um indicativo da qualidade do húmus: quanto mais próxima de um, maior o grau de humificação, demonstrando a melhor qualidade do solo mesmo em se tratando de condições favoráveis à rápida mineralização da matéria orgânica (CANELLAS et al., 2001). Em solos de ambientes tropicais, normalmente ácidos e pobres em bases, essa razão normalmente é inferior a um em razão da elevada taxa de mineralização dos resíduos vegetais, das restrições edáficas e do baixo conteúdo de bases trocáveis, comum em solos intemperizados. Esse baixo conteúdo de bases trocáveis dificulta a atividade microbiana e resulta na redução do processo de humificação (DABIN, 1981).

Ao estudarem a composição das substâncias húmicas de solos com horizonte A antrópico, Cunha et al. (2007) encontraram o predomínio das frações mais estáveis AH e H em detrimento do AF, considerada a fração mais solúvel e móvel, fato esse atribuído à formação de complexos entre a matéria orgânica e o cálcio de alta estabilidade. Os autores observaram ainda valores de 2,1 e 3,0 para a razão AH/AF, para solo antropogênico sob floresta e solo antropogênico sob cultivo, respectivamente.

Comportamento semelhante foi obtido por Cunha et al. (2009) com AH apresentando valor de 13,9 e 14,6 em TPIs sob floresta e cultivada, respectivamente, enquanto os solos não antrópicos apresentaram 7,1. Por outro lado, Miranda, Canellas e Nascimento (2007) observaram maior conteúdo das frações fúlvicas em solos de fragmentos de Mata Atlântica e plantio abandonado de eucalipto, conferindo valores para a razão AH/AF menores do que um.

4 Conclusões

As áreas amostradas apresentam baixo valor de densidade do solo. O sítio Mina II apresenta maior conteúdo de água disponível e o Manduquinha, o menor conteúdo. Ambos os sítios apresentam valores de RP acima de 2,5 MPa; no entanto, a menor disponibilidade de água verificada no sítio Manduquinha, associada à maior RP, restringem o crescimento de raízes.

As principais características químicas observadas nos sítios de Terra Preta de Índio são: elevado pH, alto teor de P disponível, baixo teor de K disponível e maiores teores de Ca, em comparação ao Mg trocável.

Nos solos antropogênicos estudados, a humina é a mais abundante entre as frações da matéria orgânica, e a fração de ácido húmico (AH) é a predominante nas frações alcalinossolúveis.

Referências

- BENITES, V. M.; MADARI, B.; MACHADO, P. L. O. A. *Extração e fracionamento quantitativo de substâncias húmicas do solo: um procedimento simplificado de baixo custo*. Rio de Janeiro, 2003. Comunicado Técnico.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Madison: American Society of America, 1986. p. 363-375.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The Nature and Properties of Soils*. 14th ed. Pearson-Prentice Hall: Upper Saddle River, 2008. 990 p.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil and Tillage Research*, v. 43, p. 205-217, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987\(97\)00015-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00015-9)
- CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RUMJANEK, V. M.; MORAES, A. A.; GURIDI, F. Distribuição da matéria orgânica e características de ácidos húmicos em solos com adição de resíduos de origem urbana. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 36, p.1529-1538, 2001.
- CANELLAS, L. P.; VELLOSO, A. C. X.; MARCIANO, C. R.; RAMALHO, J. F. G. P.; RUMJANEK, V. M.; RESENDE, C. E.; SANTOS, G. A. Propriedades químicas de um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar, com preservação do palhicho e adição de vinhaça por longo tempo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, p. 935-944, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000500018>
- COSTA, J. A.; KERN, D. C.; COSTA, M. L.; RODRIGUES, T. E.; KÄMPF, N.; LEHMANN, J.; FRAZÃO, F. J. L. Geoquímica das Terras Pretas Amazônicas. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 162-171.
- CUNHA, T. J. F.; MADARI, B. E.; BENITES, V. M.; CANELLAS, L. P.; NOVOTNY, E. H.; MOUTTA, R. O.; TROMPOWSKY, P.; SANTOS, G. A. Fracionamento químico da matéria orgânica e características de ácidos húmicos de solos com horizonte a antrópico da Amazônia (Terra Preta). *Acta Amazonica*, v. 37, p. 91-98, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672007000100010>
- 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*, v. 33, p. 85-93. 2009. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832009000100009>
- DABIN, B. Les matières organiques dans les sols tropicaux normalement drainés. *Journée Georges Aubert. Cahiers ORSTOM. Série Pédologie*, v. 28, p.197-215, 1981.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos e análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 2112 p.
- FALCÃO, N. P. S.; BORGES, L. F. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawái (*Carica papaya L.*). *Acta Amazonica*, v. 36, p. 401-406. 2006.
- FALCÃO, N. P. S.; CLEMENT, C. R.; TSAI, S. M.; COMERFORD, N. B. Pedology, fertility, and biology of Central Amazonian Dark Earths. In: WOODS, W. I.; TEIXEIRA, W. G.; LEHMANN, J.; WINKLERPRINS, A. M. G. A.; REBELLATO, L. *Amazonian dark earths: wim sombroek's vision*. Berlin: Springer, 2009. p. 213-228.
- GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Madison: American Society of America, 1986. p. 383-409.
- GLASER, B.; GUGGENBERGER, G.; ZECH, W.; RUIVO, M. L. P. Soil organic matter stability in Amazon Dark Earth. In: LEHMANN, J.; KERN, D. C.; GLASER, B.; WOODS, W. I. *Amazonian dark earths; origin, properties and management*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2003. p. 141-158.
- GLASER, B. Prehistorically modified soils of Central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 362(B), p. 187-196, 2007.
- 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*, v. 82, p. 39-51, 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>

- HILLEL, D. *Environmental soil physics*. London: Academic Press, 1998. 771 p.
- KERN, D. C.; KÄMPF, N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 13, p. 219-225, 1989.
- KERN, D. C. *Geoquímica e pedoquímica em sítios arqueológicos com terra preta na Floresta Nacional de Caxiuanã (Portel- PA)*. 1996. 124 f. Tese (Doutorado em Geologia e Geoquímica)-Universidade Federal do Pará, Belém, 1996.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 857-867, 2002.
- KLUTE, A. Water retention: Laboratory methods. In: BLACK, C.A. (Ed.). *Methods of soil analysis, I. Physical and mineralogical methods*. 2nd ed. Madison: American Society of America, 1986. p. 635-660.
- LEHMANN, J.; SILVA JUNIOR, J. P.; 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*, v. 249, p. 343-357, 2003. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- LIMA, H. N.; SCHAEFER, C. E. R.; MELLO, J. W. V.; GILKES, R. J.; KER, J. C. Pedogenesis and pre-Columbian land use of "Terra Preta Anthrosols" (Indian black earth") of Western Amazonia. *Geoderma*, v. 110, p. 1-17, 2002. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00141-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00141-6)
- MADARI, B. E.; CUNHA, T. J. F.; NOVOTNY, E. H.; MILORI, D. M. B. P.; MARTIN NETO, L.; BENITES, V. M.; COELHO, M. R.; SANTOS, G. A. Matéria Orgânica dos Solos Antrópicos da Amazônia (Terra Preta de Índio): Suas Características e Papel na Sustentabilidade da Fertilidade do Solo. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 172-188.
- MAIA, C. E.; MORAIS, E. R. C.; MEDEIROS, J. F. Capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível para as plantas em função de doses de vermicomposto. *Caatinga*, v. 18, n. 3, p. 195-199, 2005.
- MIRANDA, C. C.; CANELLAS, L. P.; NASCIMENTO, M. T. Caracterização da matéria orgânica do solo em fragmentos de mata atlântica e em plantios abandonados de eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p.905-916, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000500008>
- NEVES JUNIOR, A. F. *Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta do Índio) na Amazônia Ocidental*. 2008. 93 f. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.
- RAWLS, W. J.; PACHEPSKYB, Y. A.; RITCHIE, J. C.; SOBECKI, T. M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, v. 116, p. 61-76, 2003. [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00094-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00094-6)
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, p. 659-667, 2010. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000300007>
- SILVA, F. W. R.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; MOTTA, M. B.; SANTANA, R. M. Caracterização química e mineralogia de solos antrópicos (terras pretas de índio) na Amazônia Central. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, p. 673-681, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000300002>
- SMITH, N. J. H. Anthrosols and Human Carrying Capacity in Amazonia. *Annals of the Association of American Geographers*, v. 70, p. 553-566, 1980. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1467-8306.1980.tb01332.x>
- TAYLOR, H. M.; BURNETT, E. Influence of soil strength on root growth habits of plants. *Soil Science*, v. 98, p. 174-180, 1964. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-196409000-00006>
- TEIXEIRA, W. G.; MARTINS, G. C.; MACEDO, R. S.; NEVES JUNIOR, A. F.; MOREIRA, A.; BENITES, V. M.; STEINER, C. As propriedades físicas e hídricas dos Horizontes Antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: TEIXEIRA, W. G.; KERN, D. C.; MADARI, B. E.; LIMA, H. N.; WOODS, W. *As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas*. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2009. p. 242-250.
- TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, p. 573- 581, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>