

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL

MUDANÇAS NO USO DA TERRA E SEUS IMPACTOS SOBRE A FUNÇÃO ESTRUTURAL E A QUALIDADE DOS SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL

Heitor Marcel da Silva Ribeiro

Tecnólogo em Agroecologia

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP

CÂMPUS DE JABOTICABAL

**MUDANÇAS NO USO DA TERRA E SEUS IMPACTOS SOBRE A
FUNÇÃO ESTRUTURAL E A QUALIDADE DOS SOLOS ANTROPO-
GÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL**

Discente: Heitor Marcel da Silva Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Barboza da Silva

Coorientador: Prof. Dr. Newton Paulo de Souza Falcão

Coorientadora: Profa. Dra. Francisca Alcivânia de Melo Silva

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

R484m Ribeiro, Heitor Marcel da Silva

Mudanças no uso da terra e seus impactos sobre a função estrutural e a qualidade dos solos antropogênicos da Amazônia Central / Heitor Marcel da Silva Ribeiro. -- Jaboticabal, 2025
153 p.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientadora: Reginaldo Barboza da Silva
Coorientadora: Francisca Alcivânica de Melo Silva

1. Conservação do solo. 2. Física do solo. 3. Estrutura do solo. 4. Compactação dos solos. I. Título.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MUDANÇAS NO USO DA TERRA E SEUS IMPACTOS SOBRE A FUNÇÃO ESTRUTURAL E A QUALIDADE DOS SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL

AUTOR: HEITOR MARCEL DA SILVA RIBEIRO

ORIENTADOR: REGINALDO BARBOZA DA SILVA

COORIENTADORA: FRANCISCA ALCIVANIA DE MELO SILVA

COORIENTADOR: NEWTON PAULO DE SOUZA FALCAO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **REGINALDO BARBOZA DA SILVA**
Data: 08/05/2025 11:04:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. REGINALDO BARBOZA DA SILVA (Participação Virtual)
Departamento de Agronomia e Recursos Naturais / FCAVR UNESP Registro

Documento assinado digitalmente
 **ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA**
Data: 08/05/2025 11:20:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participação Virtual)
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Campinas/SP

Documento assinado digitalmente
 **VITOR CORRÊA DE MATTOS BARRETTO**
Data: 08/05/2025 12:11:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. VITOR CORRÊA DE MATTOS BARRETTO (Participação Virtual)
Departamento de Produção Vegetal / FCAT UNESP Dracena

Documento assinado digitalmente
 **KLEBER PEREIRA LANÇAS**
Data: 09/05/2025 06:37:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. KLEBER PEREIRA LANÇAS (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia / FCA UNESP Botucatu

Prof. Dr. DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA (Participação Virtual)
DEFERS / Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia Campus Ilha Solteira



Documento assinado digitalmente

DOUGLAS HENRIQUE BANDEIRA

Data: 08/05/2025 11:42:05-0300

Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Jaboticabal, 30 de abril de 2025

REGISTRO DE IMPACTO

A presente tese destaca a importância de compreender e prever os efeitos das mudanças no uso da terra sobre sítios antropogênicos da Amazônia Central, com foco no impacto do avanço do preparo mecanizado do solo em contraste com os efeitos do uso tradicional em quintais agroflorestais e áreas de floresta amazônica. O levantamento da qualidade do solo, especialmente em relação aos atributos físicos e mecânicos, é essencial para avaliar as respostas desses solos às diferentes práticas de manejo. Além disso, a aplicação de métodos variados de análise dos dados permite uma abordagem mais abrangente e precisa na avaliação da saúde estrutural do solo. As informações geradas sobre a qualidade estrutural e a saúde do solo como resultado da ação antrópica são fundamentais para subsidiar a criação de estratégias diferenciadas de manejo sustentável, garantindo a preservação e o uso racional dos solos de Terra Preta e Terra Mulata da Amazônia. Os resultados desta tese estão alinhados com as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 2, 3 e 15), que visam promover a segurança alimentar, a agricultura sustentável e o combate à degradação do solo.

IMPACT RECORD

This thesis highlights the importance of understanding and predicting the effects of land-use changes on anthropogenic sites in the Central Amazon, focusing on the impact of mechanized soil preparation in contrast to the effects of traditional use in agroforestry homegardens and Amazonian forest areas. Assessing soil quality, particularly in terms of physical and mechanical attributes, is essential for evaluating how these soils respond to different management practices. Moreover, the application of diverse data analysis methods enables a more comprehensive and accurate evaluation of soil structural health. The information generated on the structural quality and health of the soil as a result of anthropogenic activities is crucial for supporting the development of differentiated strategies for sustainable soil management, ensuring the preservation and rational use of Terra Preta and Terra Mulata soils in the Amazon. The results of this thesis are aligned with the goals of the Sustainable Development Goals (SDGs 2, 3, and 15), which aim to promote food security, sustainable agriculture, and the fight against soil degradation.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Heitor Marcel da Silva Ribeiro – Acriano, nascido na cidade de Xapuri no dia 06 de dezembro de 1985, filho de Mariete da Silva Beleza e Sadinoel Ferreira Ribeiro, ingressou no segundo semestre de 2013 no primeiro curso Tecnólogo em Agroecologia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Acre – IFAC, Campus Xapuri. Durante a graduação participou ativamente como voluntário em projetos de extensão voltados a arborização urbana, bem como para a produção agrícola. No período de setembro de 2015 a fevereiro de 2016, participou do intercâmbio IFAC-IPCB, cursando um semestre da graduação no curso de Licenciatura em Agronomia na Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Castelo Branco – ESA/IPCB, localizado na cidade de Castelo Branco, Portugal. Graduou-se em Tecnólogo em Agroecologia no ano de 2017 após a defesa do trabalho de conclusão de curso intitulado “Produção de Forragem e a Incidência de Plantas Daninhas em Diferentes Áreas de Pastejo em Xapuri – Acre”. No segundo semestre de 2018 ingressou no curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Agricultura no Trópico Úmido do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – PPGATU/INPA, Manaus, sob orientação do professor Dr. Newton Paulo de Souza Falcão. Durante o Mestrado participou de treinamentos e publicações científicas com foco em assuntos relativos à ciência solo, concluindo o curso em novembro de 2020. Após a aprovação do trabalho de Dissertação intitulada “Influência da Adição de Biochar Sobre as Modificações das Propriedades Físicas de um Latossolo Amarelo Distrófico da Amazônia Central”. No segundo semestre de 2021 foi aprovado no programa de Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal, sob orientação do professor Dr. Reginaldo Barboza da Silva. Desde 2023 tem atuado como professor substituto, ministrando as disciplinas de Gênese, Morfologia e Classificação do Solo; Física do Solo; Uso Manejo e Conservação do Solo, no curso de Engenharia Agrônoma da FCAVR/UNESP, Campus de Registro.

Epígrafe

“Esforça-te, e tem bom ânimo; não te atemorizes, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus está contigo, por onde quer que andares” (Josué 1:9).

Dedicatória

Dedico este trabalho à minha mãe, **Mariete da Silva Beleza**, à minha tia **Sandra da Silva Beleza**, aos meus filhos, **Paola Nogueira Ribeiro** e **Henrique Luiz de Abreu Ribeiro**, à minha esposa, **Ediane Oliveira do Amaral**, e a todos os meus familiares, pelo amor e apoio que sempre me ofereceram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela dádiva da vida, pois sem Ele nada seria possível.

À minha mãe, Mariete da Silva Beleza, por ser o meu maior exemplo de vida, pelo amor incondicional e pelo apoio em todos os momentos da minha vida.

À minha esposa, Ediane Oliveira do Amaral, por estar sempre ao meu lado, enfrentando os desafios, pelo amor, carinho e compreensão.

Aos meus filhos, Paola Nogueira Ribeiro e Henrique Luiz de Abreu Ribeiro, minhas maiores inspirações, que me motivam a seguir sempre em frente.

Às minhas tias, Sandra Beleza, Rosana Beleza, Eurides Beleza e Nirce Beleza, por serem exemplos de educadoras dedicadas, cujo amor pela educação sempre me inspirou.

Ao meu orientador, Dr. Reginaldo Barboza da Silva, por todos os ensinamentos compartilhados, pela confiança, parceria e respeito. Sou imensamente grato por ter acreditado na minha pesquisa e por todo incentivo nos momentos mais difíceis.

À minha coorientadora, Dra. Francisca Alcivânia de Melo Silva, pelo apoio, orientação, acolhimento e, sobretudo, pela amizade sincera e pela convivência sempre agradável.

Ao meu coorientador, Dr. Newton Paulo de Souza Falcão, por contribuir para o meu crescimento na pós-graduação, pelo apoio e respeito demonstrados ao longo dessa jornada.

Aos proprietários das áreas de estudo, senhores Raiati, Álvaro, Atadeu, e senhoras Angelita e Iritreia, por toda confiança, acolhimento e apoio na etapa de amostragem de solo.

Aos alunos Antônio Carlos, Davi Zannette e Guilherme Florêncio, pelo auxílio essencial nas coletas de campo e nas análises laboratoriais.

Ao meu sogro, Marcos André, pelo apoio logístico e pela parceria na etapa de coleta de solo no Amazonas.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Jaboticabal, por me proporcionar a oportunidade de realizar um Doutorado em Agronomia de excelência.

À Faculdade de Ciências do Vale do Ribeira – UNESP “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Registro, por me proporcionar a oportunidade de desenvolver minha pesquisa nas instalações do LAFMEC e IEAMAR.

A todos os meus amigos e familiares que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado e me apoiaram ao longo desses anos.

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

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Solos antropogênicos da Amazônia	3
2.2 Exploração agrícola de sítios antropogênicos da Amazônia	5
2.3 Atributos físico-mecânicos e seu papel na avaliação da saúde do solo	8
REFERÊNCIAS	13
CAPÍTULO 2 – INDICADORES DE QUALIDADE E TENDÊNCIAS NA PESQUISA SOBRE SOLOS ANTROPOGÊNICOS NO AMAZONAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA	22
RESUMO	22
1 INTRODUÇÃO	24
2 MATERIAL E MÉTODOS	26
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
3.1 Tendências e distribuição temporal das pesquisas sobre qualidade dos solos antropogênicos no Amazonas	29
3.2 Localização das áreas de estudo	30
3.3 Indicadores de qualidade e frequência de exploração desses atributos em solos antropogênicos no Amazonas	32
3.4 Interações e lacunas no conhecimento sobre os atributos e qualidade dos solos antropogênicos	34
3.5 Avanços e metodologias na avaliação da qualidade dos solos antropogênicos no Amazonas	36
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	38
REFERÊNCIAS	39
CAPÍTULO 3 – PRÁTICAS AGRÍCOLAS DE PEQUENOS PRODUTORES ALTERAM A QUALIDADE FÍSICA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL BRASILEIRA?	48
RESUMO	48
1 INTRODUÇÃO	50
2 MATERIAL E MÉTODOS	52
2.1 Descrição e características da área de estudo	52
2.2 Amostragem e análise do solo	55
2.3 Análise dos dados	58
3 RESULTADOS	58
3.1 Alterações nos atributos dependentes da relação massa e volume dos constituintes do solo	58
3.2 Alterações na estabilidade de agregados estáveis e índices estruturais	59

3.2.1 Agregados estáveis > 2 mm	59
3.2.2 Agregados estáveis 2 – 1 mm	61
3.2.3 Agregados estáveis < 1 mm	62
3.3 Teores totais e estoques de carbono e nitrogênio nos horizontes antropogênicos	66
4 DISCUSSÃO.....	69
4.1 Efeitos das práticas agrícolas e do uso da terra na saúde física dos solos antropogênicos	69
4.2 Efeitos das práticas agrícolas e do uso do solo na saúde química dos solos antropogênicos	73
5 CONCLUSÕES.....	76
REFERÊNCIAS.....	76
CAPÍTULO 4 – DISCRIMINAÇÃO DE IMPACTOS E AGRUPAMENTO DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICO-MECÂNICA DO SOLO EM SÍTIOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA.....	85
RESUMO.....	85
1 INTRODUÇÃO.....	87
2 MATERIAL E MÉTODOS	90
2.1 Descrição da área de estudo	90
2.2 Coleta e preparo de amostras de solo	94
2.3 Análise do solo.....	95
2.4 Análise dos dados.....	99
3 RESULTADOS	100
3.1 Efeito das práticas e manejo dos solos antropogênicos sobre os atributos físicos e carbono do solo	100
3.2. Efeito da mudança no uso da terra em solos antropogênicos sobre a qualidade ou comportamento dos atributos mecânicos do solo.....	103
3.3. Avaliação dos atributos mecânicos na zona friável dos solos antropogênicos	107
3.4. Avaliação dos atributos mecânicos na zona plástica dos solos antropogênicos	109
3.5 Efeito da umidade e do manejo na curva de compressão do solo	111
3.6 Modelagem da CSC do solo do tratamento de referência	116
3.7 O impacto do manejo na compactação dos solos antropogênicos	119
3.8 Interação entre os atributos físico-mecânicos e COT	123
4 DISCUSSÃO.....	129
4.1 Características e alterações dos atributos físicos em solos antropogênicos sob diferentes usos e manejo na Amazônia	129
4.2 O efeito do uso e práticas de manejo na consistência de solos antropogênicos da Amazônia	133

4.3 Comportamento mecânico dos solos antropogênicos em função da consistência do solo e práticas de manejo.....	135
4.4 Comportamento compressivo e CSC dos solos antropogênicos sob diferentes consistências e práticas de uso e manejo.....	139
4.5 Análise multivariada como ferramenta de descrição de impactos e agrupamento de atributos físico-mecânicos e químicos de solos antropogênicos da Amazônia	142
5 CONCLUSÕES.....	143
REFERÊNCIAS.....	144

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

Figura 1. Exemplo da curva de compressão do solo.....10

CAPÍTULO 2 – INDICADORES DE QUALIDADE E TENDÊNCIAS NA PESQUISA SOBRE SOLOS ANTROPOGÊNICOS NO AMAZONAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Figura 1. Quantidade de publicações em função das localidades utilizadas em amostragens de solos antropogênicos.....31

Figura 2. Publicações científicas que trataram sobre a qualidade dos solos antropogênicos no período de vinte anos (2002 a 2022) em municípios do Amazonas, Brasil.....33

Figura 3. Frequência e tipo de análises dos atributos dos solos antropogênicos no estado do Amazonas, Brasil.....35

CAPÍTULO 3 – PRÁTICAS AGRÍCOLAS DE PEQUENOS PRODUTORES ALTERAM À SAÚDE FÍSICA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL BRASILEIRA?

Figura 1. Localização da área de estudo em sítios arqueológicos da Amazônia Central brasileira.....54

Figura 2. Estabilidade de agregados no horizonte antropogênico em função de diferentes usos e manejos, distribuídos por camada.....64

Figura 3. Indicadores da qualidade estrutural do solo no horizonte antropogênico em função da profundidade e diferentes tipos de uso e práticas agrícolas.....65

Figura 4. Conteúdos e estoques de carbono e nitrogênio em três camadas do horizonte antropogênico, em diferentes tipos de uso e manejo praticados por comunidades rurais na Amazônia brasileira.....67

CAPÍTULO 4 – DISCRIMINAÇÃO DE IMPACTOS E AGRUPAMENTO DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICO-MECÂNICA DO SOLO EM SÍTIOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Figura 1. Série de dados meteorológicos (total de chuvas mensal e temperatura média mensal) referente aos anos 2021, 2022 e 2023, no município de Manacapuru, estado do Amazonas, Brasil.....91

Figura 2. Localização da área de estudo em sítios arqueológicos da Amazônia Central brasileira.....93

Figura 3. Coleta de solo e preparo das amostras com estrutura preservada e deformada.....	94
Figura 4. Coleta de dados no campo para avaliação da resistência do solo ao cisalhamento.....	96
Figura 5. Modelo de capacidade de suporte de carga do solo CSC, com as três “regiões” de análise de compactação.....	99
Figura 6. Valor médio do limite de plasticidade em solos antropogênicos sob diferentes usos e manejos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.....	104
Figura 7. Envoltórias de resistência ao cisalhamento e seus respectivos valores de coesão aparente (c , kPa) e ângulo de atrito interno (ϕ , °) da camada superficial (0,00 – 0,05 m) de Antrossolos da Amazônia sob diferentes usos e manejo.....	105
Figura 8. Curva de compressão de um solo antropogênico com floresta nativa sob conteúdos crescentes de água.....	113
Figura 9. Curva de compressão na camada 0,00 – 0,10 m de solos antropogênicos sob diferentes usos da terra.....	114
Figura 10. Curva de compressão na camada 0,10 – 0,20 m de solos antropogênicos sob diferentes usos da terra.....	115
Figura 11. Curva de compressão na camada 0,20 – 0,30 m de solos antropogênicos sob diferentes usos da terra.....	116
Figura 12. Modelos de capacidade de suporte de carga nas camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m em uma terra preta da Amazônia sob floresta nativa no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.....	118
Figura 13. Pressão de préconsolidação (σ_p) em solos antropogênicos, sob diferentes tipos de manejo, consistência [θ_1 e θ_2], e camadas de solo, tendo como referência o modelo de CSC da floresta nativa sobre um Antrossolo no município de Manacapuru, Amazonas.....	120
Figura 14. Matrix de correlação entre os atributos físicos, mecânicos e carbono total de solos antropogênicos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.....	124
Figura 15. Screeplot dos componentes principais, indicando os autovalores maiores que 1 (um), usado na interpretação da análise dos componentes principais.....	126
Figura 16. Gráfico Biplot do primeiro e segundo componente da ACP com todas as observações simultâneas das variáveis físicas, mecânicas e químicas nos diferentes usos do solo.....	128
Figura 17. Fragmentos de artefatos cerâmicos de sítios antropogênicos localizados em Manacapuru, Amazonas, Brasil.....	138

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – INDICADORES DE QUALIDADE E TENDÊNCIAS NA PESQUISA SOBRE SOLOS ANTROPOGÊNICOS NO AMAZONAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

Tabela 1. Pesquisas selecionadas entre os anos 2002 a 2022 no estado do Amazonas, Brasil.....26

CAPÍTULO 3 – PRÁTICAS AGRÍCOLAS DE PEQUENOS PRODUTORES ALTERAM A QUALIDADE FÍSICA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL BRASILEIRA?

Tabela 1. Descrição e caracterização da área experimental e respectivos tratamentos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.....57

Tabela 2. Teores médios da distribuição granulométrica (g kg^{-1}), ADA (%) e IF (%) dos solos antropogênicos, em Manacapuru, Amazonas, Brasil.....60

Tabela 3. Matriz de correlação de Pearson entre os atributos físico-estruturais e químicos dos solos antropogênicos da Amazônia Central.....68

CAPÍTULO 4 – DISCRIMINAÇÃO DE IMPACTOS E AGRUPAMENTO DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICO-MECÂNICA DO SOLO EM SÍTIOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

Tabela 1. Valores médios dos atributos físicos e carbono orgânico total de solos antropogênicos, sob diferentes usos da terra em Manacapuru, Amazonas, Brasil.....101

Tabela 2. A) Equações ajustadas para envoltórias de Coulomb e os respectivos valores de coesão aparente (c , kPa) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ , °). B) Teste de significância segundo Snedecor e Cochran (1989), entre as envoltórias de Coulomb e seus respectivos parâmetros obtidos em sistemas de uso e manejo sobre Antrossolos da Amazônia.....106

Tabela 3. Atributos mecânicos do solo sob dois conteúdos de água do solo [θ_1 , θ_2], em solos antropogênicos do município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.....110

Tabela 4. Coeficientes dos modelos de capacidade de suporte carga (CSC) [$\sigma_p = 10^{(a + b \theta)}$] de um solo antropogênico com floresta nativa, e as significâncias do teste de homogeneidade das variâncias, segundo sugestão de Snedecor e Cochran (1989) 117

Tabela 5. Parâmetros da análise de componentes principais entre os atributos físico-mecânicos e carbono de solos antropogênicos sob diferentes usos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.....125

MUDANÇA NO USO DA TERRA E SEUS IMPACTOS SOBRE A FUNÇÃO ESTRUTURAL E A QUALIDADE DOS SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL

RESUMO – A mudança no uso da terra (MUT) tem degradado os solos, impactando diretamente sua função estrutural e saúde. Solos antropogênicos, como a Terra Preta da Amazônia (TPA) e a Terra Mulata (TM), são caracterizados por alta fertilidade e capacidade de retenção de carbono, porém, a intensificação agrícola e o preparo mecanizado têm modificado significativamente suas propriedades físico-químicas e mecânicas. Este estudo teve como objetivo avaliar os impactos da MUT sobre a qualidade físico-estrutural e saúde dos solos antropogênicos da Amazônia Central. O estudo foi conduzido em áreas localizadas na região metropolitana de Manaus, Amazonas, abrangendo solos antropogênicos sob diferentes usos e manejos. Para isso, a pesquisa foi estruturada em três etapas: (I) revisão sistemática da literatura para identificar os principais indicadores de qualidade do solo utilizados em estudos sobre solos antropogênicos no estado do Amazonas; (II) análise dos efeitos de diferentes práticas agrícolas sobre a saúde física do solo e os estoques de carbono e nitrogênio; e (III) discriminação dos impactos da MUT sobre atributos físico-mecânicos, utilizando diferentes abordagens metodológicas de avaliação dos atributos do solo. As coletas foram realizadas em solos de Terra Preta da Amazônia e Terra Mulata, localizados no município de Manacapuru, em dezembro de 2023, considerando as camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m. Os resultados demonstraram que o uso intensivo da mecanização contribui para a degradação estrutural do solo, promovendo compactação especialmente nas camadas superficiais. Por outro lado, sistemas tradicionais de uso da terra, como os quintais agroflorestais, apresentam maior resiliência estrutural e menor impacto na qualidade física dos solos. A análise multivariada permitiu distinguir o efeito dos diferentes manejos a partir da avaliação simultânea dos atributos físico-mecânicos e carbono do solo. Conclui-se que a adoção de estratégias diferenciadas de manejo sustentável é essencial para garantir a preservação da estrutura e a manutenção da qualidade dos solos antropogênicos da Amazônia.

Palavras-chave: Atributos físicos, Compactação do solo, Carbono do solo, Terra Preta

LAND USE CHANGE AND ITS IMPACTS ON THE STRUCTURAL FUNCTION AND QUALITY OF ANTHROPOGENIC SOILS IN CENTRAL AMAZONIA

ABSTRACT – Land-use change (LUC) has been degrading soils, directly impacting their structural function and health. Anthropogenic soils, such as Amazonian Dark Earth (ADE) and Brown Soil (BS), are characterized by high fertility and carbon retention capacity. However, agricultural intensification and mechanized tillage have significantly altered their physico-chemical and mechanical properties. This study aimed to assess the impacts of LUC on the structural quality and health of anthropogenic soils in Central Amazonia. The research was conducted in areas within the metropolitan region of Manaus, Amazonas, encompassing anthropogenic soils under different land uses and management practices. The study was structured in three stages: (I) a systematic literature review to identify the main soil quality indicators used in studies on anthropogenic soils in the state of Amazonas; (II) an analysis of the effects of different agricultural practices on soil physical health and carbon and nitrogen stocks; and (III) the discrimination of LUC impacts on physico-mechanical attributes using different methodological approaches to soil attribute assessment. Soil samples were collected from Amazonian Dark Earth and Terra Mulata soils in the municipality of Manacapuru in December 2023, considering the layers 0.00–0.10 m, 0.10–0.20 m, and 0.20–0.30 m. The results showed that intensive mechanization contributes to soil structural degradation, promoting compaction, particularly in surface layers. On the other hand, traditional land-use systems, such as agroforestry home gardens, exhibit greater structural resilience and lower impacts on soil physical quality. Multivariate analysis allowed for distinguishing the effects of different management practices through the simultaneous evaluation of physico-mechanical attributes and soil carbon. It is concluded that the adoption of differentiated sustainable management strategies is essential to ensure the preservation of soil structure and the maintenance of the quality of anthropogenic soils in the Amazon.

Keywords: Physical attributes, Soil compaction, Soil carbon, Amazonian Dark Earth

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1 INTRODUÇÃO

O impacto da mudança no uso da terra (MUT) tem sido amplamente debatido em todo o mundo, especialmente devido aos seus efeitos no contexto das mudanças climáticas (Kassun et al., 2025). A MUT é considerada a segunda maior fonte antropogênica de emissão de dióxido de carbono (CO_2), ficando atrás apenas da queima de combustíveis fósseis. Por isso, a regulamentação dessa prática tem ganhado atenção como estratégia para mitigar os impactos ambientais (Gasser et al., 2020; Tang et al., 2023).

Na Amazônia brasileira, uma das principais preocupações ambientais continua sendo o alto índice de desmatamento, impulsionado principalmente pela expansão agrícola, que se destaca como um dos principais fatores na MUT na região da Amazônia Legal. Devido à sua vasta extensão, esse ecossistema é altamente susceptível a alterações tanto em escalas regionais quanto globais (Borma et al., 2013).

A conversão da vegetação nativa para sistemas agrícolas tradicionais ou convencionais, aliada ao uso inapropriado do solo, têm levado à degradação dos solos e à redução da qualidade dos seus atributos físicos, químicos e biológicos (Rojas et al., 2016). De modo geral, práticas de manejo agropecuário impactam significativamente a qualidade e ou saúde dos solos brasileiros (Carvalho et al., 2018).

Embora grande parte das avaliações sobre os efeitos da MUT na qualidade do solo seja direcionada a extensas áreas agrícolas com solos de origem natural (Cherubin et al., 2016; Santos et al., 2021), a Amazônia apresenta cenários distintos que exigem uma análise mais detalhada. Um desses cenários diz respeito à atividade agrícola, cujo preparo do solo, ultimamente tem sido feito de forma convencional. No entanto, em pequenas e médias propriedades rurais, a mecanização pode ser limitada ou empregada de maneira indiscriminada, influenciando o grau de degradação do solo. Por outro lado, em algumas partes dessa região explorada por comunidades rurais e ribeirinhas, o cultivo dos solos está fortemente associado ao conhecimento tradicional, resultando em diferentes formas de uso e manejo da terra. Um exemplo disso é o uso do solo para a implementação de Quintais Agroflorestais, um sistema de subsistência semelhante aos Sistemas Agroflorestais (SAF), desenvolvido principalmente por famílias ribeirinhas em áreas reduzidas (Gervazio et al., 2022; Rayol e Miranda, 2019).

Atualmente, o setor agrícola no estado do Amazonas tem demonstrado um interesse crescente pelo aumento da produtividade nas lavouras. Nas últimas décadas, alguns produtores passaram a adotar o preparo convencional do solo, especialmente em municípios próximos à capital, Manaus, onde a presença de rodovias facilita o escoamento da produção, realidade distinta daqueles municípios mais distantes, onde o transporte fluvial continua sendo o principal meio de deslocamento.

O avanço da agricultura, aliado às práticas de manejo convencionais, tem alcançado áreas de solos antropogênicos no estado do Amazonas. Na Amazônia Central, esses solos, conhecidos como Terra Preta da Amazônia (TPA) e Terra Mulata (TM), são altamente férteis, apresentam elevados teores de carbono estocado, e favorecem o cultivo agrícola com pouca ou nenhuma necessidade de adubação mineral (Soares et al., 2018; Denevan 2009). Segundo Teixeira et al. (2005) essas terras são tradicionalmente ocupadas por populações “caboclas”, que as utilizam para cultivos intensivos de mamão, laranja e algumas espécies hortícolas. No entanto, apesar de sua qualidade física e química superior à dos solos de origem natural, a MUT tem causado degradação de seus atributos estruturais e químicos (Brito et al., 2018; Frozzi et al., 2020).

Os estudos de avaliação da qualidade e, ou saúde desses solos frente à MUT tem sido conduzida, principalmente, por meio de pesquisas sobre a fertilidade (Ribeiro et al., 2023) e carbono orgânico total (Batistão et al., 2020), deixando uma lacuna de informações sobre o impacto do uso da mecanização por longos períodos no provável comprometimento da função estrutural desses solos (Silva et al., 2003). Nesse contexto, vale destacar que, para solos antropogênicos manejados convencionalmente, é fundamental realizar avaliações que para além do complexo sortivo, sejam consideradas informações relativas à capacidade de suporte de carga, compactação e rupturas desses solos; que análises integrativas e multivariadas sejam realizadas considerando simultaneamente os atributos físico-estruturais e químicos, buscando caracterizar melhor os impactos das mudanças no uso da terra na Amazônia.

Assim, a hipótese desta pesquisa é que a mudança no uso da terra em solos antropogênicos da Amazônia, caracterizada pela substituição da floresta nativa por sistemas agrícolas manejados de forma tradicional e convencional, promove alterações na saúde estrutural e química desses solos ao longo do tempo.

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo central quantificar os impactos da mudança no uso da terra sobre a qualidade físico-mecânica e química de solos antropogênicos (Terra Preta da Amazônia e Terra Mulata) no estado do Amazonas, Brasil.

O estudo foi conduzido em três etapas principais: a) Análise da ocorrência de pesquisas focadas na avaliação dos indicadores de qualidade e saúde dos solos antropogênicos no estado do Amazonas; b) quantificação dos impactos da MUT na saúde físico-estrutural e nos estoques de carbono e nitrogênio em solos antropogênicos localizados na região metropolitana de Manaus; e c) avaliação dos efeitos da MUT sobre os atributos físico-mecânicos, considerando diferentes abordagens metodológicas para a análise das propriedades do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solos antropogênicos da Amazônia

O bioma Amazônia corresponde a 60% do território brasileiro, ocupando cerca de 5,5 milhões de km², distribuídos entre os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Rondônia, Roraima, Pará, parte do Maranhão e Tocantins (Ferreira et al., 2005; IBGE, 2015). De modo geral, os solos dessa região são altamente intemperizados, profundos, com altos teores de ferro e alumínio, baixa saturação por bases, elevada acidez, e baixa fertilidade mesmo sob florestas nativas, uma vez que o acúmulo de material orgânico (serapilheira) é limitado a camada mais superficial, sendo rapidamente perdido (Lima et al., 2011). O clima tropical (quente e úmido) é o fator determinante na quantidade e qualidade da matéria orgânica, uma vez que as condições climáticas da região aceleram a decomposição desse material, cuja altas temperaturas e pluviosidade favorecem a rápida mineralização da matéria orgânica do solo (Ferreira et al., 2012).

De acordo com Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos - SiBCS, as classes dos Latossolos e Argissolos são predominantes na região norte, e ocupam cerca de 75% da área total no Brasil (Sanchez et al., 1982; Santos et al., 2018). Esses solos são caracterizados pelos altos teores de caulinita, mineral de argila com baixa CTC, bem como altos teores de óxidos de Fe (hematita e goethita) e Al (gibbsite), o que os conferem principalmente as colorações vermelho, amarelo ou vermelho-amarelo,

como observado no segundo nível categórico dos Latossolos e Argissolos (Costa et al., 1999).

Estudos frequentemente relacionam, de forma generalista, a baixa fertilidade aos solos da Amazônia. No entanto, essa afirmação, pode ser equivocada ao considerar a diversidade edáfica existente nesse bioma, que, mesmo em pequena escala, abriga solos de origem antropogênica com características significativamente distintas daqueles de origem natural (Fraser et al., 2011). No Brasil, os principais solos antropogênicos, conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI), Terra Preta Antropogênica ou Terra Preta da Amazônia (TPA), e Terra Mulata (TM) (Soares et al., 2018; Denevan, 2009), ocupam aproximadamente 0,1% a 0,3% da Amazônia brasileira, com áreas que podem variar de um a quatrocentos hectares (Sombroek et al., 2006). Cabe ressaltar que esses solos muitas vezes descritos como sítios arqueológicos, apresentam alta densidade de ocorrência, especialmente ao longo das margens do rio Amazonas, na região da Amazônia Central (Clement et al., 2015).

Esses pedoambientes resultaram da ocupação e do modo como os indígenas pré-colombianos habitavam a Amazônia, tanto em assentamentos ou aldeias, onde normalmente são encontradas as Terras Pretas, quanto em áreas utilizadas para práticas agrícolas, como é o caso das Terras Mulatas (Denevan, 2009). A hipótese mais aceita sustenta a ideia de que o caráter fértil desses solos está relacionado às ações antrópicas, com deposição de resíduos orgânicos em combinação com atividades de queima controlada (Glaser e Birk, 2012; Kawa et al., 2015; Lombardo et al., 2022).

Nesse contexto, diversos cientistas acreditam que a Terra Preta foi formada a partir do lixo das vilas pré-européias, construída de cinzas e por fragmentos culturais, fezes, ossos e restos domésticos de jardins (Denevan 2001; Woods e McCann 1999). Por outro lado, o solo menos escuro e com horizonte A menos espesso (Terra Mulata), que constitui ocorrências muito mais extensas, tem sua origem ligada à agricultura intensiva ou semi-intensiva (Sombroek et al., 1966; Glaser et al., 2001). A evidência da presença humana há milhares de anos na Amazônia baseia-se nos finos de carvão (biocarvão) e fragmentos de artefatos cerâmicos encontrados nesses solos (Glaser et al., 2001). A elevada concentração destes artefatos cerâmicos em alguns locais de TPA condicionam características físicas e hídricas específicas, relacionadas principalmente à maior capacidade de retenção de água no solo (Macedo et al., 2008), e a maiores resistências mecânicas do solo quando estes são submetidos a condições de baixa umidade (Soares et al., 2021).

Segundo Lima et al. (2002) e Lehmann et al. (2003), o biocarvão encontrado no horizonte A desses solos antrópicos, tem origem da queima parcial e transformação de diversos resíduos pelo processo de pirólise, incluindo restos de peixes, carapaças de tartarugas, animais caçados, biomassa vegetal, sementes, conchas, dejetos humanos, entre outros materiais. Todavia, o biocarvão encontrado na Terra Mulata está associado basicamente a queima (pirólise) de resíduos de árvores, uma vez que se acredita que esses solos tenham sido formados em áreas cujo a prática agrícola era comum em alguns assentamentos indígenas (Novotny et al., 2009).

Os elevados níveis de fertilidade e matéria orgânica estável desses solos (Terra Preta e Terra Mulata), são as principais características que os diferenciam dos solos adjacentes de origem natural (Batistão et al., 2020; Cunha et al., 2018). Entretanto, a existência desses solos antropogênicos evidencia que, a melhoria de solos tropicais altamente intemperizados é possível como resultado da ação antrópica (Glaser e Birk, 2012).

Além dos altos conteúdos de carbono orgânico, as características químicas dos solos de Terra Preta e Terra Mulata também são fortemente relacionadas à maiores teores P disponível, Ca, Mg, Mn e Zn, bem como pH na faixa de 6,0 (Falcão e Borges, 2006). Em decorrência disso, esses solos demonstram alta capacidade de troca catiônica (CTC), baixa acidez potencial, baixa ou nula saturação por alumínio e elevada saturação por bases em comparação aos solos adjacentes. No entanto, a fertilidade da Terra Preta Amazônica (TPA) é superior à da Terra Mulata (TM), a qual, por sua vez, é mais fértil do que os demais solos naturais da região (Hecth, 2003).

Esses solos também apresentam melhor qualidade física e hídrica nas camadas mais superficiais quando comparados aos solos adjacentes, conferindo-lhes com isso, maior resiliência à degradação estrutural do solo mesmo em sistemas agrícolas convencionais com práticas mecanizadas (Teixeira e Martins, 2003).

2.2 Exploração agrícola de sítios antropogênicos da Amazônia

No Brasil, o bioma Amazônia compreende 3.423.287 km² de áreas naturais ou preservadas, enquanto 712.090 km² correspondem a áreas antropizadas (IBGE, 2023). Os diversos usos da terra, portanto, estão associados às necessidades e tradições dos povos amazônidas distribuídos entre os estados que compõem essa região (Rayol e Miranda, 2019).

No estado do Amazonas, a fruticultura representa uma importante atividade agrícola e econômica. No entanto, observa-se que a maior parte da produção frutícola está concentrada nos municípios da Região Metropolitana de Manaus, com destaque para os cultivos de mamão e laranja. No ano de 2023, a área plantada ou destinada à colheita dessas duas culturas, no Amazonas, totalizou 2.367 hectares, sendo 1.584 hectares destinados à laranja e 783 hectares ao mamão (IBGE, 2023).

Os municípios de Rio Preto da Eva e Manacapuru se destacam pelos maiores níveis de produção dessas culturas, o que se justifica principalmente pela facilidade de escoamento da produção, proporcionada pelo acesso rodoviário, e pela proximidade com o principal mercado consumidor, localizado em Manaus. Juntos, esses dois municípios respondem por cerca de 46% da produção total de laranja e 38% da produção de mamão no estado. Vale enfatizar que Manacapuru lidera a produção de mamão, enquanto Rio Preto da Eva se destaca na produção de laranja (IBGE, 2023).

Em contraste à produção agrícola, encontra-se nesse estado, a ocupação de lotes de terra destinadas a formação de quintais agroflorestais (Lima, 2019). Esse tipo de sistema de uso da terra pode ser encontrado em quase todas as regiões tropicais e subtropicais do mundo, onde os sistemas de produção de subsistência predominam (Kabashima et al., 2009).

Segundo Miller et al. (2006), os quintais agroflorestais na Amazônia apresentam variações quanto ao tamanho e à diversidade de espécies, tanto em escala local, na qual propriedades dentro de uma mesma comunidade diferem entre si, quanto em nível regional. Embora essas variações possam ser justificadas, é evidente que não existe um modelo único de quintal agroflorestal, mas sim tendências e padrões, ainda que compartilhem características comuns, como a complexidade estrutural e a multifuncionalidade. Para Rocha Garcia et al. (2015), esse tipo de sistema está fortemente relacionado à segurança alimentar das famílias, devido a produção de alimento para complementação da dieta familiar baseada no cultivo de espécies alimentícias, horta caseira e plantas medicinais.

Diversos arranjos de quintais agroflorestais podem ser observados, considerando que cada família possui objetivos, necessidades e estratégias distintas, voltadas à subsistência, à comercialização ou à conservação ambiental, o que também se reflete na composição das espécies cultivadas (Lima, 2019). Além disso, esses sistemas são dinâmicos, podendo se modificar ao longo do tempo (Costantin, 2010). Consequentemente, tratam-se de agroecossistemas que se assemelham aos ecossistemas

naturais e, por isso, demandam o uso reduzido de insumos, além de provocarem menor impacto ambiental (Peyre et al., 2006; Carvalho et al., 2007; Lima, 2019).

Ao se considerar os ambientes com solos de origem antropogênica na Amazônia, observa-se que esses territórios são amplamente manejados por pequenos agricultores, sobretudo em sistemas de subsistência baseados na agricultura itinerante com uso de corte e queima (Falcão et al., 2009). Os cultivos sobre essas terras são favorecidos pelos níveis elevados da maioria dos nutrientes essenciais ao crescimento das plantas, que são muito superiores aos níveis críticos para a maioria das plantas cultivadas na Amazônia (Teixeira et al., 2009). Em algumas regiões da Amazônia, observa-se que esses solos também vêm sendo utilizados para o cultivo de pastagens (Soares et al., 2018; Soares et al., 2021).

Convém destacar ainda que o tempo de pousio, prática comum em sistemas agropecuários na região, tende a ser mais curto em áreas de solos antropogênicos, quando comparado aos solos adjacentes (German et al., 2003). Entretanto, atualmente, em função do avanço agropecuário na região amazônica, tem sido observada uma maior ocorrência na implantação de sistemas agrícolas sobre esses solos de origem antrópica, mas, ainda há uma considerável ocupação e uso dessas terras por sistemas de manejo tradicional, como em quintais agroflorestais. Esse sistema tradicional de uso da terra reúne diferentes espécies de plantas e animais localizados próximos moradias humanas (Cultrera et al., 2012; Frozzi et al., 2020).

A agrobiodiversidade característica desses quintais contribui tanto para a produção de alimentos para consumo doméstico (Frison et al., 2011) quanto com a renda extra, por meio da venda do excedente (Galluzi et al., 2010). Além disso, os quintais agroflorestais da Amazônia Central desempenham importantes papéis sociais para além da produção de alimentos. Esses espaços fazem parte do cotidiano e da dinâmica de muitas famílias da Amazônia, contribuindo no fortalecimento das relações interpessoais, manutenção de tradições e costumes (Rayol e Miranda, 2019).

Portanto, o uso das terras antropogênicas da Amazônia não é influenciado apenas pelas suas características biofísicas do meio, mas também pelas características socioculturais dos grupos humanos que a ocupam (Kumar e Nair, 2004). Assim, os sistemas agrícolas encontrados nas Terras Pretas da Amazônia e Terras Mulatas são extremamente variados, indo de monoculturas intensivas de espécies de alta demanda no mercado, como hortaliças e fruteiras (German 2002; Hiraoka et al., 2003), a pomares caseiros extremamente diversos (Major et al., 2005).

2.3 Atributos físico-mecânicos e seu papel na avaliação da saúde do solo

O solo é um elemento fundamental que sustenta a vida na Terra (Bardgett e Van Der Putten, 2014; Guerra et al., 2022), desempenhando importantes papéis na sustentabilidade ambiental e no funcionamento da biodiversidade (Pulleman et al., 2022). Outro ponto relevante é que os solos sob vegetação nativa apresentam características físicas consideradas adequadas (Andreola et al., 2000), no entanto, quando esse mesmo solo sofre alterações, formando camadas compactadas ou adensadas, as consequências são degradadoras, afetando atributos físicos, químicos e biológicos (Jimenez et al., 2008).

Normalmente, os impactos negativos são causados pelo uso indevido desses solos, com a falta de tecnologias e opções de manejo apropriados a esses pedoambientes (Iori et al., 2012). Essas atividades promovem limitações no funcionamento dos serviços ecossistêmicos desempenhado pelo elemento solo, como as funções de permeabilidade, disponibilidade de nutrientes, estoque de carbono e entre outros (Freddi et al., 2007; Fu et al., 2015). Na Amazônia, Oliveira et al. (2015) avaliando a qualidade física de um solo sob diferentes manejos, evidenciaram que as práticas agrícolas intensivas alteraram a qualidade física do solo elevando a sua densidade e resistência à penetração, com consequente redução do volume e porosidade.

Diante da crescente demanda global por alimentos, fibras e bioenergia, a intensificação da agricultura tem se tornado uma tendência em diversas regiões do mundo (Godfray et al., 2010). Nesse cenário, o acelerado aumento da produção agrícola, tanto em quantidade quanto em qualidade, está diretamente relacionado ao tráfego contínuo de máquinas. A trafegabilidade nas lavouras, especialmente sobre solos em condições de alta umidade, contribui para alterações nos atributos físicos e, consequentemente, na qualidade estrutural, tornando-os mais suscetíveis à compactação e à erosão (Oliveira et al., 2013).

O processo de compactação tem sido apontado como a principal causa da degradação física, pela redução dos espaços porosos dos solos (Raper, 2005). De modo geral, as propriedades do solo são fortemente influenciadas pelo tipo de uso e manejo adotado, afetando aspectos estruturais do solo, como a formação de camadas compactadas e redução significativa da macroporosidade, distúrbios no tamanho e na estabilidade dos agregados, alterações na taxa de infiltração de água, além do aumento

da resistência à penetração de raízes (RP) e da densidade do solo (Souza et al., 2014).

Segundo Singer e Ewing (2000), os atributos mais adequados para serem utilizados como indicadores da qualidade física do solo são aqueles que contemplam aspectos fundamentais ao desenvolvimento radicular, como a profundidade efetiva de enraizamento, porosidade total, distribuição e tamanho dos poros, distribuição granulométrica, densidade do solo, resistência à penetração das raízes, intervalo hídrico ótimo, índice de compressão e estabilidade dos agregados.

Comumente, as propriedades físicas do solo são analisadas a partir de relações ponderais entre massa e volume observadas em sua estrutura (Molina Junior, 2017). Nesse contexto, a densidade do solo (D_s) destaca-se como uma propriedade clássica no campo da física do solo, sendo amplamente utilizada para avaliar a qualidade estrutural de solos em ambientes agrícolas e florestais. Além disso, quando a densidade de partículas (D_p) é conhecida, sua combinação com a densidade do solo permite estimar a porosidade total (PT) (Culley, 1993).

A estabilidade de agregados é outro atributo físico importante que fornece informações relevantes sobre a função estrutural do solo. A formação de agregados pode resultar da união mecânica promovida por células e hifas de organismos, dos efeitos cimentantes de produtos oriundos da síntese microbiana ou da ação estabilizadora de compostos provenientes da decomposição, atuando individualmente ou de forma combinada (Vezzani e Mielniczuk, 2011).

Com o uso intensivo de tecnologias voltadas à motomecanização das atividades agrícolas e florestais, a compactação do solo passou a representar um fator limitante ao aumento da produtividade. Nesse contexto, a identificação da susceptibilidade à compactação ganha relevância, configurando-se como um importante elemento de restrição econômica (Kondo e Dias Junior, 1999).

Essas avaliações tornam-se limitadas quando as investigações são direcionadas apenas sobre os atributos físicos de rotina (densidade do solo, porosidade, resistência do solo à penetração, e etc.). Isso porque as pressões aplicadas ao solo podem exceder a sua capacidade de suporte de carga (CSC), que varia em função da umidade (Kondo e Dias Junior, 1999). Por esse motivo, é necessário entender a resiliência e ou estabilidade dos solos através do seu comportamento compressivo, usando a curva de compressão do solo (Dias Junior e Pierce, 1995).

Geralmente nota-se que, em solos secos, considerando sua alta CSC, o processo de compactação não ocorre ou é sem importância, entretanto, quando o solo está úmido, sua CSC é baixa, tornando-o vulnerável ao processo de compactação (Larson et al., 1980).

Nas últimas décadas, a curva de compressão do solo, obtida por meio do ensaio de compressão uniaxial, tem se consolidado como um importante método de análise do comportamento compressivo do solo em sistemas de manejos agrícolas sobre solos brasileiros (Dias Junior e Pierce, 1996; Dias Junior, 1994). Essa curva representa graficamente a relação entre o logaritmo da pressão aplicada e um parâmetro associado à estrutura do solo, sendo mais comumente a densidade do solo (D_s) ou o índice de vazios (Casagrande, 1936; Smith et al., 1997).

Quando o solo não foi submetido a pressões anteriores (sem histórico de tensões), como ocorre em áreas de mata nativa, a relação entre pressão e deformação tende a ser teoricamente linear, de modo que qualquer pressão aplicada resulta em deformações não-recuperáveis (Lebert e Horn, 1991; Dias Junior e Pierce, 1995). Por outro lado, em solos que já experimentaram pressões anteriores (com histórico de tensões), como os manejados com cultivos agrícolas ou pastagens, ou passaram por ciclos de secagem e umedecimento, a aplicação de novas pressões pode provocar deformações relativamente pequenas e potencialmente recuperáveis, ou ainda deformações permanentes (Gupta et al., 1989; Lebert e Horn, 1991).

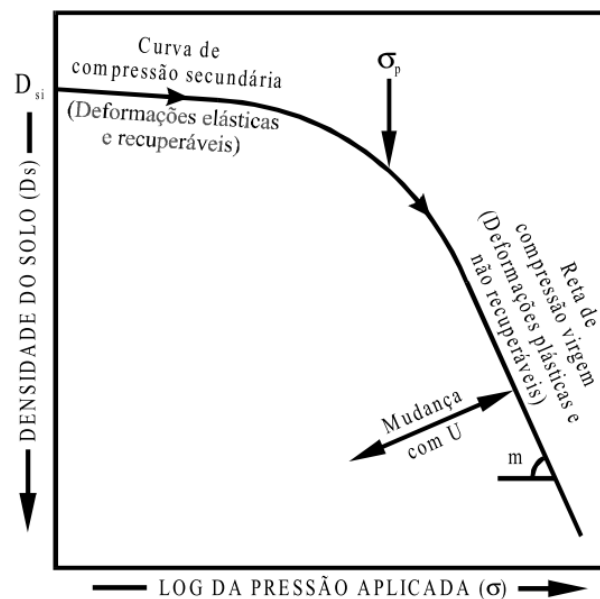


Figura 1. Exemplo da curva de compressão do solo, segundo Dias Junior (1994). D_{si} = densidade do solo inicial; U = umidade; σ_p = pressão de préconsolidação; m = curva de compressão do solo.

Em suma, a curva de compressão do solo é composta por duas regiões distintas: uma de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, conhecida como curva de compressão secundária; e outra de deformações plásticas e irreversíveis, denominada reta de compressão virgem, na qual ocorre a compactação adicional do solo. O ponto que separa essas duas regiões é denominado pressão de préconsolidação (σ_p) (Holtz e Kovacs, 1981; Dias Junior e Pierce, 1995, 1996) (Fig. 1). O declive da reta de compressão virgem é chamado de índice de compressão (m), o qual pode ser utilizado como indicador da susceptibilidade do solo à compactação (Smith et al., 1997). Assim, os parâmetros D_{si} , σ , D_s correspondente a σ_p e m , definem a posição e a forma das curvas de compressão do solo, as quais variam em função da classe de solo, do teor de umidade e do tipo de manejo adotado, podendo ainda ser influenciadas pela mineralogia (Assouline et al., 1997).

Apesar do amplo entendimento sobre o processo de compactação do solo (Larson et al., 1989; Soane e Ouwerkerk, 1994), ainda são escassos os estudos que quantificam o efeito da variação da umidade na pressão de préconsolidação, especialmente em condições brasileiras (Dias Junior, 1994; Dias Junior e Pierce, 1996).

Essa escassez de informações também se estende aos parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos e às suas relações com outras propriedades, o que tem limitado o desenvolvimento de técnicas voltadas à estabilidade dos agrossistemas (Rocha et al., 2002). A resistência ao cisalhamento é expressa pela equação de Coulomb: $\tau = c + \sigma_n \tan \phi$ (Vargas, 1989), em que τ representa a máxima tensão cisalhante suportada pelo solo, σ_n é a tensão normal atuante na superfície de falhamento, c é o intercepto de coesão (ou coesão aparente) e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo, definido como o ângulo entre a força normal e a resultante das forças atuantes sobre o maciço terroso. Essa equação determina a envoltória de resistência ao cisalhamento como uma variável dinâmica do solo, que representa o limite de resistência dos solos, ou seja, qualquer força cisalhante que ultrapasse essa linha provocará a ruptura do solo (Rocha et al., 2002).

Dessa maneira, a resistência ao cisalhamento do solo (RC) também pode ser utilizada como um indicador de compactação (Ayers e Perumpral, 1982; Schjonning,

1991). De modo geral, solos mais compactados apresentam maior resistência ao cisalhamento, em razão da menor distância entre as partículas, o que resulta em um menor índice de vazios e exige maior esforço no preparo do solo para o cultivo (Azevedo, 1999; Rocha et al., 2002).

Os efeitos do manejo são refletidos em alterações nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo. Nesse contexto, a maioria dos atributos químicos do solo apresentam maior variação quando comparados aos atributos físicos (Chaves et al., 2005). No entanto, o monitoramento de indicadores químicos e físicos pode ser utilizado no diagnóstico da saúde do solo (Hussain et al., 2022), que se expressa pela sua capacidade de sustentar o desenvolvimento das plantas, mantendo a sua produtividade e a qualidade ambiental (Martinazzo, 2006).

A matéria orgânica (MO) é considerada em diversos estudos como um dos principais indicadores da qualidade do solo, devido à sua estreita relação com diversas funções e processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no ambiente edáfico (Soares, 2018). Além disso, mostra-se um componente sensível às práticas de manejo, por ser susceptível a alterações e por apresentar correlação com a maioria dos atributos do solo (Mielniczuck, 1999). Segundo Cox et al. (2000) e Souza et al. (2014), o cultivo intensivo da terra é apontado como o principal responsável pela diminuição da porosidade do solo, do tamanho de agregados e da taxa de infiltração de água, além do aumento da resistência à penetração das raízes e da densidade. Essas alterações ocorrem, muitas vezes, em paralelo à diminuição do teor de matéria orgânica do solo, que é um dos principais agentes responsáveis pela formação e estabilização de agregados (Castro Filho et al., 1998).

Dessa forma, considerando o solo como um sistema complexo, resultante da interação entre fatores geológicos, topográficos, climáticos, entre outros, que, em conjunto, influenciam os indicadores químicos e físicos responsáveis por sua caracterização, torna-se possível empregar técnicas de análise integrativa ou multivariada para explorar, de maneira mais eficiente, as correlações entre essas variáveis e identificar aquelas que mais contribuem para a caracterização ou alterações na saúde do solo (Pragana et al., 2012; Rojas et al., 2016).

REFERÊNCIAS

- ANDREOLA F, COSTA LM, OLSZEWSKI N (2000) Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma terra roxa estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 857-865.
- ASSOULINE S, TAVARES-FILHO J, TESSIER D (1997) Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61:390-398.
- AYERS PD; PERUMPRAL JV (1982) Moisture and density effect on cone index. *Trans. Am. Sci. Agric. Eng.*, 21:1169-1172.
- AZEVEDO MAA (1999) Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa – MG. Viçosa, MG, **Universidade Federal de Viçosa**, 169p. (Dissertação de Mestrado)
- BARDGETT RD, VAN DER PUTTEN, WH (2014) Belowground biodiversity and ecosystem functioning. **Nature**, 515:505-511. doi:10.1038/nature13855
- BATISTÃO AC, HOLTHUSEN D, REICHERT JM, SANTOS LAC, CAMPOS MCC (2020) Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, 363(July 2019), 114130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130>
- BORMA LDS, NOBRE CA, CARDOSO M (2013) Response of the Amazon Tropical Forests to Deforestation, Climate, and Extremes, and the Occurrence of Drought and Fire. In: PIELKE, R.A. (Ed.). *Climate Vulnerability: Understanding and Addressing Threats to Essential Resources*. **Academic Press**: Cambridge, p. 153-163, 2013.
- BRITO WBM, COSTA CAMPOS MC, CAMPOS MANTOVANELLI B, DA CUNHA JM, FRANCISCON U, RODRIGUES SOARES MD (2018) Spatial variability of soil physical properties in Archeological Dark Earths under different uses in southern Amazon. **Soil and Tillage Research**, 182(May), 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.008>
- CARVALHO AJA, SOUZA EH, MARQUES CTS, GAMA EVS, NACIF PGS (2007) Caracterização física dos solos dos quintais agroflorestais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, Bahia. **Revista Brasileira de Agroecologia**, 2: 941-944.
- CARVALHO MAC, PANOSSO AR, RIBEIRO TEE, ARAÚJO EG, BRANCAGLIONI VA, DALLACORT R (2018) Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, 184, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.004>
- CASAGRANDE A (1936) The determination of the pre-consolidation load and its practical significance. In: CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, Cambridge, **Proceeding**. Cambridge, v.3, p.60-64.

CASTRO FILHO C, MUZILLI O, PODANOSCHI AL (1998) Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, 22, 527–538.

CHAVES LHG, CHAVES IB, VASCONCELOS ACF, LEÃO AB (2005) Avaliação de potássio, matéria orgânica e fósforo em neossolos dos perímetros irrigados Engenheiro Arcoverde e São Gonçalo, PB. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, n.2, p.1-7.

CHERUBIN MR, KARLEN DL, FRANCO ALC, TORMENA CA, CERRI CEP, DAVIES CA, CERRI CC (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, 267(2016), 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

CLEMENT CR, DENEVAN WM, HECKENBERGER MJ, JUNQUEIRA AB, NEVES EG, TEIXEIRA WG, WOODS WI (2015) The domestication of Amazonia before European conquest. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1812). <https://doi.org/10.1098/RSPB.2015.0813>

COSTA ACS, BIGHAM JM, RHOTON FE, TRAINA SJ (1999) Quantification and characterization of maghemite in soil derived from volcanic rocks in Southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, v. 47, n. 4, p. 466-473.

COSTANTIN AM, VIEIRA ARR (2010) Quintais agroflorestais na visão dos agricultores de Imaruí-SC. **Revista Brasileira de Agroecologia**, 5(2) 303-305.

COX PM, BETTS RA, JONES CD, et al. (2000) Aceleração do aquecimento global devido a feedbacks do ciclo de carbono em um modelo climático acoplado. **Nature**, 408(6809):184–187.

CULLEY JLB (1993) Density and compressibility. In: CARTER, M.R. (Ed.). *Soil Sampling and Methods of Analysis*, Boca Raton; Ann Arbor; **London: Lewis Publishers**, p. 529–539.

CULTRERA M, CHRISTINA MAM, FERREIRA FC (2012) Agricultura urbana e conservação de agrobiodiversidade: um estudo de caso em Mato Grosso, Brasil. **Sitientibus Série Ciências Biológicas**, 12(2), 323–332.

CUNHA JM, CAMPOS MCC, GAIO DC, DE SOUZA ZM, SOARES MDR, DA SILVA DMP, SIMÕES EL (2018) Spatial variability of soil respiration in Archaeological Dark Earth areas in the Amazon. **CATENA**, 162, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.001>

DENEVAN (2009) As Origens Agrícolas da Terra Mulata na Amazônia. In: TEIXEIRA WG. et al. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1. ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. p. 82 - 86.

DENEVAN WM (2001) *Cultivated Landscapes of Native Amazonia and the Andes*. New York: **Oxford University Press**.

DIAS JUNIOR MS (1994) Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic. **East Lansing, Michigan State University**, 114p. (Tese de Doutorado)

DIAS JUNIOR MS, PIERCE FJ (1995) A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, 8(2), 139–151. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00015-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00015-8)

DIAS JUNIOR MS; PIERCE FJ (1996) O processo de compactação do solo e sua modelagem. **R. Bras. Ci. Solo**, 20:175-182.

FALCÃO N, MOREIRA A, COMENFORD NB (2009) A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia central. **As Terras Pretas de Índio Da Amazônia: Sua Caracterização e Uso Deste Conhecimento Na Criação de Novas Áreas**, 189–200.

FALCÃO NPS, BORGES LF (2006) Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya* L.) 1 production of papaya (*Carica papaya* L.) in Central Amazonia. **Acta Amazonica**, 36(4), 401–406.

FERREIRA AO, MORAES JCS, HARMS MG, MIARA S, BRIEDIS C, NETTO CQ, SANTOS JB, CANALLI LB (2012) Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in Campos Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 5, p. 1583-1590.

FERREIRA LV, VENTICINQUE E, ALMEIDA S (2005) O desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. *Estudos Avançados*, v. 19, n. 53, p. 157-166. for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. **Soil Tillage Res.** 155, 250–262.

FRASER J, TEIXEIRA W, FALCÃO N, WOODS W, LEHMANN J, JUNQUEIRA AB (2011) Anthropogenic soils in the Central Amazon: From categories to a continuum. **Area**, 43(3), 264–273. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2011.00999.x>

FREDDI OS, CENTURION JF, ROSOLEM CA (2007). Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 31(4), 627-636.

FRISON EA, CHERFAS J, HODGKIN T (2011) Agricultural Biodiversity Is Essential for a Sustainable Improvement in Food and Nutrition Security. **Sustainability**, Basel, v.3, p.238-253.

FROZZI JC, DA CUNHA JM, CAMPOS MCC, BERGAMIN AC, BRITO WBM, FRANCISCON U, DA SILVA DMP, DE LIMA AFL, DE BRITO FILHO EG (2020) Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. **Environmental Earth Sciences**, 79(11), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08948-x>

FU B, ZHANG L, XU Z, ZHAO Y, WEI Y, SKINNER D (2015) Ecosystem services in changing land use. **J. Soils Sediments**, 15, 833–843.

GALLUZZI G, EYZAGUIRRE P, NEGRI V (2010) Home Gardens: Neglected Hotspots of Agrobiodiversity and Cultural Diversity. **Biodiversity Conservation**, v.19, p.3635–3654.

GASSER T, CREPIN L, QUILCAILLE Y, HOUGHTON RA, CIAIS P, OBERSTEINER M (2020) Historical CO₂ emissions from land use and land cover change and their uncertainty. **Biogeosciences**, 17, 4075–4101. <https://doi.org/10.5194/bg-17-4075-2020>

GERMAN L (2003) Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. **Geoderma**. P. 307–331.

GERMAN LA (2002) The dynamics of terra preta: an integrated study of human-environmental interaction in a nutrient-poor Amazonian ecosystem. PhD Thesis, **University of Georgia**, Athens, GA, USA.

GERVAZIO W, YAMASHITA OM, ROBOREDO D, BERGAMASCO SMPP, FELITO RA (2022) Quintais agroflorestais urbanos no sul da Amazônia: os guardiões da agrobiodiversidade? **Ciência Florestal**, 32(1), 163–186. <https://doi.org/10.5902/1980509843611>

GLASER B, BIRK JJ (2012) State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). **Geochemica et Cosmochimica Acta**, 82, 39–51. <https://doi.org/10.1016/J.GCA.2010.11.029>

GLASER B, HAUMAIER L, GUGGENBERGER G, ZECH W (2001) The Terra Preta phenomenon – a model for sustainable agriculture in the humid tropics. **Naturwissenschaften**, v. 88, n. 1, p. 37–41.

GODFRAY HCJ, BEDDINGTON JR, CRUTE IR, HADDAD L, LAWRENCE D, MUIR J. F, TOULMIN C (2010) Food security: the challenge of feeding 9 billion people. **Science**, 327(5967), 812–818. <https://doi.org/10.1126/science.1185383>

GUERRA CA, et al. (2022) Global hotspots for soil nature conservation. **Nature**, 610:693–698. <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05292-x>

GUPTA SC, HADAS A, SCHAFER RL (1989) Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON WE, BLAKE GR, ALLMARAS RR, VOORHEES WB, GUPTA SC eds. Mechanics and related process in structured agricultural soils. **Dordrecht, Kluwer Academic**, p.137–152.

HECHT SB (2003) Indigenous Soil Management and the Creation of Amazonian Dark Earths: Implications of Kayapó Practice. In: LEHMANN J, KERN DC, GLASER B, WOODS WI (eds) Amazonian Dark Earths. **Springer**, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_18

HIROAKA M, et al. (2003) Contemporary use and management of Amazonian dark Earth. In: LEHMANN J, et al. (Ed.) Amazonian dark earths: origins, Properties, management. **Dordrecht: Kluwer Academic Publishers**, 406, p.387.

HOLTZ RD; KOVACS WD (1981) An introduction to geotechnical engineering. **Englewood Cliffs**, Prentice-Hall. 733p.

HUSSAIN Z, DENG L, WANG X, CUI R, LIU G (2022) A Review of Farmland Soil Health Assessment Methods: Current Status and a Novel Approach. **Sustainability**, 14(15), 9300. <https://doi.org/10.3390/su14159300>

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal**. SIDRA: Sistema IBGE de Recuperação Automática. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 05 abr. 2025.

IBGE. Estados. IBGE, Brasília, 20 out. 2015. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/estadosat/>. Acesso em: 02 mar. 2025.

IORI, P., SILVA, R. B. DA, DIAS JÚNIOR, M. DE S., & LIMA, J. M. DE. (2012). Pressão de preconsolidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, 36(5), 1448–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500008>

JIMENEZ RL, GONÇALVES WG, ARAÚJO FILHO JV, ASSIS RL, PIRES FR, SILVA GP (2008) Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 116–121.

KABASHIMA Y, ANDRADE MLF, GANDARA FB, TOMAS FL (2009) Sistemas agroflorestais em áreas urbanas - revisão de literatura. **REVESBAU**, Piracicaba – SP, 4(3): 01-20.

KASSUN BW, KALLIO M, TRØMBORG E, RANNESTAD MM (2025) Land use and land cover change, trade-offs, and synergies between ecosystem services in a dry Afromontane Forest. **Journal for Nature Conservation**, 85, 126874. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.126874>

KAWA NC, CLAVIJO MICHELANGELI JA, CLEMENT CR (2015) Household Agrobiodiversity Management on Amazonian Dark Earths, Oxisols, and Floodplain Soils on the Lower Madeira River, Brazil. **Human Ecology** 2015 43:2, 43(2), 339–353. <https://doi.org/10.1007/S10745-015-9738-0>

KONDO MK, DIAS JUNIOR MS (1999) COMPRESSIBILIDADE DE TRÊS LATOSSOLOS EM FUNÇÃO DA UMIDADE E USO. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, 23, 211–218.

KUMAR BM, NAIR PKR (2004) The enigma of tropical homegardens. **Agroforestry Systems**, p. 135-152.

LARSON WE, BLAKE GR, ALLMARAS RR, VOORHEES WB, GUPTA SC (1989) Mechanics and related processes in structured agricultural soils. **Dordrecht, Kluwer Academic**, 273p. (Nato Applied Science, 172)

LARSON WE, GUPTA SC, USECHE RA (1980) Compression of agricultural soils from eight soils orders. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 44:450-457.

LEBERT M; HORN R (1991) A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil Tillage. Res.**, 19:274-286.

LEHMANN J, SILVA JÚNIOR JP, STEINER C, NEHLS T, ZECH W, GLASER B (2003) 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, n. 2, p. 343-357.

LIMA HN, SCHAEFER CER, MELLO JWV, GILKES RJ, KER JC (2002) Pedogenesis and pre-Columbian land use of "Terra Preta Anthrosols (Indian black earth)" of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, n. 5, p. 1-17.

LIMA RS (2019) Quintais agroflorestais: estudo de caso da comunidade boa esperança, município de Presidente Figueiredo, Amazonas. **Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia**. (Dissertação de Mestrado)

LIMA SS, LEITE LFC, OLIVEIRA FC, COSTA DB (2011) Atributos químicos e estoques de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v.35, n. 1, p. 51-60.

LOMBARDO et al. (2022) Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, 13(1), 3444. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2>

MACEDO RS, et al. (2008) Caracterização de dois perfis com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) no Lago do Limão – AM. In: **XI Congresso da Abequa XII Congresso da Abequa: Estudos do quaternário e a responsabilidade sócio-ambiental**, Belém. Abequa/UFPA.

MAJOR J, et al. (2005) Influence of market orientation on food plant diversity of farms located on Amazonian Dark Earth in the region of Manaus, Amazonas, Brazil. **Economic Botany**, v.59, n.1, p.77.

MARTINAZZO R (2006) Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado. Santa Maria, **Universidade Federal de Santa Maria**, 83p. (Dissertação de Mestrado)

MIELNICZUK J (1999) Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS GA; CAMARGO FAO, eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo. Ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre, **Genesis**, p.1-8.

MILLER RP, PENN JR, VAN LEEUWEN J (2006) Amazonian homegardens: Their ethnohistory and potential contribution to agroforestry development. In: KUMAR BM, NAIR PKR (Ed.) *Tropical homegardens: A time-tested example of sustainable agroforestry*. Springer, Dordrecht, Netherlands. p. 43-60.

MOLINA JUNIOR WF (2017) Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas. In *Comportamento mecânico do solo em operações agrícolas* (Issue January). Universidade de São Paulo. **Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz.”** <https://doi.org/10.11606/9788592238407>

NOVOTNY EH, HAYES MHB, MADARI BE, BONAGAMBA TJ, DEAZEVEDO ER, DE SOUZA AA, SONG G, NOGUEIRA CM, MANGRICH AS (2009) Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the Utilisation of Charcoal for Soil Amendment. **J. Braz. Chem. Soc**, 20(6), 1003–1010.

OLIVEIRA IA, CAMPOS MCC, SOARES MDR, AQUINO RE, MARQUES JÚNIOR J, NASCIMENTO EP (2013) Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região Sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n.4, p.1103-1112.

OLIVEIRA PR, DE CENTURION JF, CENTURION MAPC, ROSSETTI KV, FERRAUDO AS, FRANCO HBJ, PEREIRA FS, BÁRBARO JÚNIOR LS (2013) Qualidade estrutural de um latossolo vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, 37(3), 604–612. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300006>

PEYRE A, GUIDAL A, WIERSUM KF, BONGERS F (2006) Dynamics of homegarden structure and function in Kerala, India. **Agroforestry systems**, 66(2): 101-115.

PRAGANA RB, RIBEIRO MR, NÓBREGA JCA, FILHO MRR, DA COSTA JA (2012) Qualidade física de Latossolos Amarelos sob plantio direto na região do Cerrado Piauienses. **Revista Brasileira de Ciencia Do Solo**, 36(5), 1591–1600. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500023>

PULLEMAN MM, DE BOER W, GILLER KE, KUYPER TW (2022) Soil biodiversity and nature-mimicry in agriculture; the power of metaphor?. **Outlook on Agriculture** 51:75-90. <https://doi.org/10.1177/00307270221080180>

RAPER RL (2005) Agricultural traffic impacts on soil. **J. Terramech.**, 42:259-280.

RAYOL BP, MIRANDA IS (2019) Quintais agroflorestais na Amazônia Central: caracterização, importância social e agrobiodiversidade. **Ciência Florestal**, 29(4), 1614–1629. <https://doi.org/10.5902/1980509829853>

RAYOL BP; MIRANDA IS (2019). Quintais agroflorestais na Amazônia Central: caracterização, importância social e agrobiodiversidade. **Ciência Florestal**, 29(4), 1614–1629. <https://doi.org/10.5902/1980509829853>

RIBEIRO HMS, SILVA FA, DE PINTO RB, FALCÃO NPS, SILVA RB (2023) Indicadores de qualidade e ocorrência de solos antropogênicos na Amazônia central: uma revisão sistemática. **Revista de biologia e ciências da terra**, 23(1), 89–104.

ROCHA GARCIA BN, VIEIRA TA, OLIVEIRA FA (2015) Quintais agroflorestais e segurança alimentar em uma comunidade rural na Amazônia Oriental. **Revista de la Facultad de Agronomía**, La Plata, 114(1).

ROCHA WW, DIAS J, LIMA JM, MIRANDA EEV, SILVA AR (2002). Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 26, 297–303.

ROJAS JM, PRAUSE J, SANZANO GA, ARCE OEA, SÁNCHEZ MC (2016) Soil quality indicators selection by mixed models and multivariate techniques in deforested areas for agricultural use in NW of Chaco, Argentina. **Soil and Tillage Research** 155: 250- 262.

SANCHEZ PA, BANDY D, VILLARICA J, NICHOLAIDES J (1982) Amazon basin soils: management for continuous crop production. **Science**, v. 216, n. 4548, p. 821-827.

SANTOS HG, JACOMINE PKT, ANJOS LHC, OLIVEIRA VA, LUMBRERAS JF, COELHO MR, ALMEIDA JA, ARAUJO FILHO JC, OLIVEIRA JBCT (2018) Sistema brasileiro de classificação de solos. In **Embrapa Solos**.

SANTOS RS, WIESMEIER M, CHERUBIN MR, OLIVEIRA DMS, LOCATELLI JL, HOLZSCHUH M, CERRI CEP (2021) Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, 400(March), 115149. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115149>

SCHJONNING P (1991) Soil strength as influenced by texture, water content and soil management. **Soil Till. Res.**, 12:277-283.

SILVA RB, DIAS JUNIOR MS, SILVA FAM, FOLE SM (2003) O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados. **Revista Brasileira de Ciência Do Solo**, 27, 973–983.

SINGER M, EWING S (2000) Soil quality. In: SUMNER, M. E. (Ed.). Handbook of soil science. **Boca Raton: CRC Press**, p.271-298.

SMITH CW, JOHNSTON MA, LORENTZ S (1997) Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil Till. Res.**, 41:53-73.

SOANE BD; van OUWERKERK C (1994) Soil compaction in crop production. Amsterdam, **Elsevier**, 660p.

SOARES MDR (2018) Atributos do solo em Terras Pretas Arqueológicas sob diferentes usos. **Universidade Estadual de Campinas**. (Tese de Doutorado)

SOARES MDR, CAMPOS MCC, CUNHA JM WECKNER FC, BRITO FILHO, MANTOVANELI BC, LEITE AFL (2018) Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, 12(2), 125–133. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOARES MDR, DE SOUZA ZM, CAMPOS MCC, DA SILVA RB, ESTEBAN DAA, NORONHA RL, DOS SANTOS, GOMES MG, DA CUNHA JM (2021) Land-use change and its impact on physical and mechanical properties of Archaeological Black Earth in the Amazon rainforest. **CATENA**, 202(August 2020), 105266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105266>

SOMBROEK W, RUIVO MDL, FEARNside PM GLASER B, LEHMANN J (2006) Amazonian Dark Earths as Carbon Stores and Sinks. In **Amazonian Dark Earths** (pp. 125–139). Kluwer Academic Publishers. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_7

SOMBROEK WG (1966) Amazon soil: a reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen: **Center for Agricultural Publications and Documentation**.

SOUZA GS, SOUZA ZM, SILVA RB (2014) Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. 2014;38(1): 135–146. doi:10.1590/S0100-06832014000100013

SOUZA GS, SOUZA ZM, SILVA RB, et al. (2014) Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38(1): 135–146. doi:10.1590/S0100-06832014000100013

TANG Z, WANG Y, FU M, XUE J (2023) The role of land use landscape patterns in the carbon emission reduction: Empirical evidence from China. **Ecological Indicators**, 156, Article 111176. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111176>

TEIXEIRA WG, MARTINS GC, COELHO MR, MARTINS JS, SHINZATO E (2005) As Terras Pretas de Índio no Distrito Agropecuário da Suframa. **Suframa**. Manaus, p.1-13.

TEIXEIRA WG., MARTINS GC, MACEDO RS, NEVES JUNIOR AF, MOREIRA A, BENITES VM, STEINER C (2009) 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. (Eds). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. p. 242-250.

TEIXEIRA WG; MARTINS GC (2003) Soil physical characterization. In: LEHMANN J, KERN DC, GLASSER B, WOODS WI (Eds.) **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 271–286.

VARGAS M (1989) Introdução à mecânica dos solos. São Paulo, **McGraw-Hill**, 509p.

VEZZANI FM, MIELNICZUK J (2011) Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p.213-223.

WOODS WI; MCCANN JM (1999) The anthropogenic origin and persistence of Amazonian dark earths. In: The Yearbook of Conference of Latin American Geographers, **Austin**. University of Texas, p. 7-14.

CAPÍTULO 2 – INDICADORES DE QUALIDADE E TENDÊNCIAS NA PESQUISA SOBRE SOLOS ANTROPOGÊNICOS NO AMAZONAS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

RESUMO – A origem e a alta fertilidade dos solos antropogênicos da Amazônia têm sido objeto de pesquisa científica ao longo do tempo. No entanto, ainda há uma lacuna de conhecimento sobre a qualidade física, química e biológica desses solos diante do avanço das práticas de preparo do solo na região amazônica. Assim, este trabalho teve como objetivo verificar a efetividade das pesquisas científicas que avaliaram a qualidade dos solos antropogênicos, e analisar os avanços nas técnicas para prospecção dos indicadores de qualidade do solo nesses pedoambientes no estado do Amazonas, Brasil. No ano de 2022 os dados foram obtidos a partir de diferentes publicações (dois livros, duas teses e 28 artigos científicos), totalizando 32 pesquisas disponíveis na web. As buscas foram realizadas em periódicos científicos indexados nas bases de dados *Science Direct*, *Google Scholar* e *SciELO*, utilizando as seguintes palavras-chave: solos antropogênicos, Terra Preta da Amazônia, qualidade do solo e avaliação da qualidade do solo. Observou-se um aumento na quantidade de publicações nos últimos anos, com concentração dessas pesquisas na região sul do Amazonas. A maioria dos estudos utilizou predominantemente avaliações dos atributos químicos do solo em solos antropogênicos situados no estado do Amazonas. Esses resultados indicam que ainda há uma carência de estudos que relacionem a qualidade desses solos ao tempo de manejo e às mudanças no uso da terra em áreas exploradas por décadas na região da Amazônia Central.

Palavras-chave: Amazonas, Horizonte A antrópico, Terra Mulata, Qualidade do solo

CHAPTER 2 – QUALITY INDICATORS AND RESEARCH TREND ON ANTHROPOGENIC SOILS IN AMAZONAS: A SYSTEMATIC REVIEW

ABSTRACT – The origin and high fertility of Amazonian anthropogenic soils have been the subject of scientific research over time. However, there is still a knowledge gap regarding the physical, chemical, and biological quality of these soils in the face of increasing soil preparation practices in the Amazon region. Thus, this study aimed to assess the effectiveness of scientific research evaluating the quality of anthropogenic soils and analyze advances in prospecting techniques for soil quality indicators in these pedoenvironments in the state of Amazonas, Brazil. In 2022, data were obtained from various publications (two books, two dissertations, and 28 scientific articles), totaling 32 studies available online. The searches were conducted in indexed scientific journals within the Science Direct, Google Scholar, and SciELO databases, using the following keywords: anthropogenic soils, Amazonian Dark Earth, soil quality, and soil quality assessment. An increase in the number of publications was observed in recent years, with research concentrated mainly in the southern region of Amazonas. Most studies predominantly used chemical soil attribute evaluations in anthropogenic soils located in Amazonas state. These results indicate that there is still a lack of studies relating soil quality to management time and land-use changes in areas that have been exploited for decades in the Central Amazon region.

Keywords: Amazonas, Anthropic A horizon, Brown Soil, Soil quality

1 INTRODUÇÃO

A avaliação da saúde dos solos antropogênicos na Amazônia Central é essencial para compreender seu potencial agrícola, bem como seu papel na conservação da biodiversidade e na mitigação das mudanças climáticas. Esses solos, localizados em grande parte no estado do Amazonas, apresentam características únicas, como alta capacidade de retenção de nutrientes, água e carbono, tornando-se recursos valiosos para a agricultura sustentável. Além disso, a preservação desses solos é fundamental para entender a história e a ecologia da região amazônica, promovendo práticas agrícolas mais sustentáveis e contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

Os solos antropogênicos, caracterizados pelo horizonte A antrópico, são formados a partir da ocupação humana na Amazônia (Smith, 1980). Esses horizontes resultam da antropogênese, que se sobrepõe à pedogênese (Neves Junior, 2008), e ocupam cerca de 0,1 – 0,3% da Amazônia brasileira (Sombroek et al., 2006). Eles são conhecidos por diferentes denominações, como Terra Preta de Índio (TPI), Terras Pretas Arqueológicas ou Terra Preta amazônica (TPA) (Soares et al., 2018a), e Terra Mulata (Denevan, 2009), sendo especialmente importantes na região central da Amazônia, onde têm relevância econômica e social significativa no estado do Amazonas.

Acredita-se que esses solos escuros e férteis foram formados pela deposição de resíduos orgânicos combinados com atividades de queima (Glaser e Birk, 2012). Como resultado, foram enriquecidos em nutrientes durante a ocupação por populações pré-colombianas (Teixeira et al., 2009a), há pelo menos 6.500 anos atrás (Glaser, 2007; Glaser e Birk, 2012; MCmichael et al., 2014; Clement et al., 2015; Watling et al., 2018). Esses solos apresentam horizontes A espessos e escuros, elevados teores de P, Ca e micronutrientes como Mn e Zn (Sombroek, 1966; Kern e Kampf, 1989), além de maiores teores de matéria orgânica em comparação com solos adjacentes (McCann et al., 2001; Lima et al., 2002; Soares et al., 2018a).

De modo geral, esses solos demonstram resiliência à degradação química e física ao longo do tempo, mesmo sob uso agrícola intensivo e preparo convencional (Teixeira et al., 2009b). Por isso, são amplamente utilizados pela população local para produção agrícola, especialmente no cultivo de hortaliças, fruticultura e culturas anuais (Teixeira e Martins, 2006; Teixeira et al., 2005; Kim et al., 2007).

Vale destacar que a formação de quintais agroflorestais também é uma prática comum, especialmente em pequenos lotes de terra sobre solos antropogênicos ocupados por famílias ribeirinhas descendentes de indígenas, onde o uso do solo ocorre de forma não mecanizada. Esses quintais são sistemas tradicionais de manejo da terra que integram diversas espécies de plantas e animais, geralmente localizados nas proximidades das residências humanas (Cultrera et al., 2012).

No entanto, mudanças no uso e manejo desses solos têm levado à sua degradação química e física (Cunha et al., 2018; Brito et al., 2018; Frozzi et al., 2020). Assim, torna-se necessário o desenvolvimento de ferramentas para quantificar sua qualidade com base nos constituintes químicos, físico-mecânicos e biológicos, bem como avaliar sua resiliência frente aos diferentes usos e manejos. Esses indicadores podem ser integrados em índices abrangentes de qualidade do solo com análise multivariada, permitindo avaliações quantitativas e integrativas dos efeitos das MUT sobre as funções do solo e os serviços ecossistêmicos, auxiliando agricultores e gestores envolvidos na formulação de políticas e práticas agrícolas (Cherubin et al., 2016; Cavalcanti et al., 2020).

Apesar dos avanços, estudos recentes ainda se concentram principalmente na origem desses solos (Silva et al., 2021b), ou em sua caracterização (Campos et al., 2011). A maioria das pesquisas está limitada a propriedades físicas, como resistência à penetração e relação massa-volume (Campos et al., 2011; Santos et al., 2013; Brito et al., 2018), ou a análises de fertilidade relacionadas à produção agrícola (Falcão e Borges, 2006).

Dado esse cenário, é fundamental identificar os indicadores mais utilizados para inferir a qualidade dos solos antropogênicos, bem como localizar as pesquisas desenvolvidas no estado do Amazonas. Além disso, é relevante observar a frequência e a ocorrência dessas publicações na literatura nacional e internacional. Portanto, este estudo teve como objetivo verificar a efetividade da produção científica relacionada à qualidade do solo, e analisar os avanços nas técnicas e avaliações sobre os indicadores de qualidade dos solos antropogênicos no Amazonas, Brasil, nas últimas duas décadas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

No primeiro trimestre do ano de 2022, examinou-se os métodos utilizados para avaliação da qualidade dos solos antropogênicos no estado do Amazonas, Brasil, com ênfase nos atributos físicos, químicos e biológicos. Os dados foram obtidos de diferentes publicações (2 livros, 2 teses, e 28 artigos científicos), totalizando 32 pesquisas publicadas de acesso aberto na web (Tab. 1). As buscas foram realizadas em periódicos científicos indexados nas seguintes bases de dados: *Science Direct*, *Google Scholar* e *SciELO*, utilizando palavras-chave em português como: Solos antropogênicos, Terra Preta amazônica, Qualidade do solo, e Avaliação da qualidade do solo. E em inglês: *Anthropogenic soils*, *Amazonian Dark Earth*, *Soil quality*, and *Soil quality assessment*. Os critérios para a exclusão dos artigos foram os seguintes:

a) publicações que antecedem o ano 2002; b) estudos realizados fora do estado do Amazonas, Brasil; c) estudos conduzidos em casa de vegetação; d) estudos que avaliaram exclusivamente a origem dos solos antropogênicos; e) trabalhos de conclusão de curso, resumos em congresso, e publicações como comunicado técnico e ou boletins.

Por outro lado, adotou-se dois critérios para adesão: a) estudos que avaliaram ao menos um dos indicadores que expressa qualidade do solo (químico, físico ou biológico); b) trabalhos que avaliaram os parâmetros do solo isoladamente ou correlacionados às características agronômicas das culturas.

Em seguida, cada trabalho selecionado foi avaliado através de suas bases de dados e a partir disso foram classificados seguindo as seguintes observações: a) localização do estudo (município e região do estado); b) ano de publicação; c) tipo de atributo utilizado para avaliar a qualidade do solo (qualidade química, física, ou biológica do solo).

Tabela 1. Pesquisas selecionadas entre os anos 2002 a 2022 no estado do Amazonas, Brasil.

Autoria	Ano	Título	Periódico
Falcão e Borges	2006	Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (<i>Carica papaya</i> L.) Fertilidade, Matéria Orgânica E Substâncias Húmicas Em Solos	Acta Amazonica

Moreira	2007	Antropogênicos da Amazônia Ocidental	Bragantia
Neves Jr.	2008	Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
Cunha et al.	2009	<i>Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin</i>	Revista Brasileira de Ciência do Solo
Souza et al.	2009	<i>Phosphorous forms in cultivated indian black earth (anthrosols) of varying texture in the Brazilian Amazon</i>	Revista Brasileira de Ciência do Solo
Teixeira et al.	2009	As Terras Pretas de índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas áreas	Embrapa Amazônia Ocidental
Woods et al.	2009	<i>Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision</i>	Springer Netherlands
Campos et al.	2011	Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira	Bragantia
Fraser et al.	2011	Anthropogenic soils in the Central Amazon: from categories to a continuum	Area
Campos et al.	2012	Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas	REVISTA AGRO@MBIENTE
Souza et al.	2012	Terra preta de índio na região amazônica	Scientia Amazonia
Aquino et al.	2014	Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênicos e não antropogênicos na região de Manicoré, AM	Bioscience Journal
Oliveira et al.	2014	<i>Spacil Variability and Sampling Density of Chemical Attributes in Archaeological Black Earth and Native Forest Soil in Manicoré, AM</i>	Floresta
Moline	2016	Formas de fósforo, substâncias húmicas e nitrogênio inorgânico em áreas da Amazônia Ocidental	Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias
Chagas et al.	2017	<i>Evaluation of the impact of citrus cultivation on carbon and nitrogen stocks of light organic matter</i>	Revista Virtual de Química

		<i>fractions of amazonian dark earth (ADE) and surrounding soils (Oxisoil) from central Amazonia</i>	
Cunha et al.	2017	Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia	Ambiente e Água
Gomes et al.	2017	Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses of indian black earth in southern Amazonas	Bioscience Journal
Oliveira et al.	2017	<i>Multivariate technique for determination of soil pedoenviromental indicators in Southern Amazonas</i>	Acta Scientiarum
Brito et al.	2018	<i>Spatial variability of soil physical properties in Archeological Dark Earths under different uses in southern Amazon</i>	Soil and Tillage Research
Soares et al.	2018	Variabilidade espacial do estoque de carbono e atributos físicos do solo em terra preta arqueológica sob pastagem	Ambiente e Água
Alho et al.	2019	Spatial variation of carbon and nutrients stocks in Amazonian Dark Earth	Geoderma
Lima et al.	2019	<i>Spatial variability and sampling density of chemical attributes in archaeological black earths under pasture in southern Amazonas, Brazil</i>	SOIL Discussions
Bastião et al.	2020	<i>Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil</i>	Geoderma
Brito et al.	2020	<i>Dynamics and spatial aspects of erodibility in Indian Black Earth in the Amazon, Brazil</i>	Catena
Frozzi et al.	2020	<i>Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region</i>	Environmental Earth Sciences
Mantovanelli et al.	2020	<i>Pedoindicators attributes in the variation of CO₂ efflux in Indian black earth and non-anthropic soils</i>	Carbon Management
Souza et al.	2020	<i>Aggregate stability and carbon stocks in Forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil</i>	Carbon Management

Demetrio et al.	2021	<i>A "Dirty" Footprint: Macroinvertebrate diversity in Amazonian Anthropogenic Soils</i>	Global Change Biology
Lima et al.	2021	<i>Spatial Behavior of Soil Chemical Attributes In An Area of Black Indian Soil With Pasture Cultivation</i>	Revista Brasileira de Geografia Física
Silva et al.	2021	<i>Impact of different crops on the spatial variability of the chemical attributes of Indian black earth in Southern Amazonas</i>	Bragantia
Soares et al.	2021	<i>Land-use change and its impact on physical and mechanical properties of Archaeological Black Earth in the Amazon rainforest</i>	Catena
Soares et al.	2022	<i>Physical Quality and Porosity Aspects of Amazon Anthropogenic Soils under Different Management Systems</i>	Applied and Environmental Soil Science

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Tendências e distribuição temporal das pesquisas sobre qualidade dos solos antropogênicos no Amazonas

Do total de trinta e dois trabalhos selecionados, grande parte deles foram desenvolvidos no período de 2017 a 2022, com publicações que correspondem 56,25% (n = 18). Isso significa que os estudos que avaliaram a qualidade dos solos antropogênicos a partir dos indicadores químicos, físicos ou biológicos do solo, ainda são recentes, considerando as últimas duas décadas. Por outro lado, nota-se que os atributos químicos têm sido mais reportados ao longo desses anos de pesquisa. Além disso, o ano de 2020 correspondeu a maior produção científica, com um total de 5 publicações, seguido dos demais anos na seguinte ordem decrescente: 2020 (cinco publicações) > 2021 (quatro publicações) = 2017 (quatro publicações) > 2018 (duas publicações) = 2019 (duas publicações) > 2022 (uma publicação).

No período de dez anos (2006 a 2016), 43,75% (n = 14) dos trabalhos científicos relacionados à qualidade dos solos antropogênicos foram publicados. Durante esse período, o ano de 2009 destacou-se como o de maior produção científica, com quatro artigos publicados. Nos demais anos, a produção foi distribuída de forma mais

modesta: 2007 e 2008 (um artigo cada), 2011 e 2012 (dois artigos cada), 2014 (dois artigos) e 2016 (um artigo).

A distribuição dos artigos entre revistas científicas foi heterogênea com a maioria das publicações concentradas em periódicos brasileiros. Por outro lado, a maior parte das pesquisas (62,5%, $n = 20$) foi publicada em língua inglesa. De acordo com Simon et al. (2022), isso pode ser atribuído ao crescimento da pesquisa brasileira na área, tanto em quantidade quanto em qualidade. Para esses autores, publicar em inglês, especialmente em revistas de prestígio nacionais e internacionais, aumenta a visibilidade e a probabilidade de os trabalhos serem lidos e citados, além de ser uma estratégia eficaz para ampliar a disseminação do conhecimento científico em escala global.

Do total de doze publicações encontradas em português (37,5%, $n = 12$), 25% dessas ($n = 3$) foram publicadas em formatos distintos: duas teses e um livro. As teses foram desenvolvidas por estudantes de duas universidades do estado de São Paulo, na região Sudeste, enquanto o livro foi publicado pela Embrapa Amazônia Ocidental, localizada em Manaus, no estado do Amazonas, na região Norte. Esses materiais foram publicados nos anos de 2008, 2016 e 2009, respectivamente. Além disso, pouco mais de 58% ($n = 7$) dessas publicações ocorreram entre 2011 e 2017, enquanto aproximadamente 17% ($n = 2$) datam de 2006 e 2007.

3.2 Localização das áreas de estudo

Um total de treze municípios no estado do Amazonas foi identificado como objeto de pesquisa em estudos sobre solos antropogênicos, submetidos a pelo menos uma avaliação de qualidade do solo. Essas análises foram realizadas com base em indicadores químicos, físicos ou biológicos. As publicações empregaram diferentes estratégias metodológicas para amostragem, variando na quantidade de áreas ou localidades investigadas, conforme descrito a seguir: a) estudos que analisaram áreas em apenas um único município representaram a maioria (65,75%); b) estudos que realizaram análises comparativas com amostras de solo de dois municípios corresponderam a 18,75% ($n = 6$); c) estudos que investigaram áreas em mais de dois municípios, com fins comparativos, representaram 12,5% ($n = 4$) (Fig. 1).

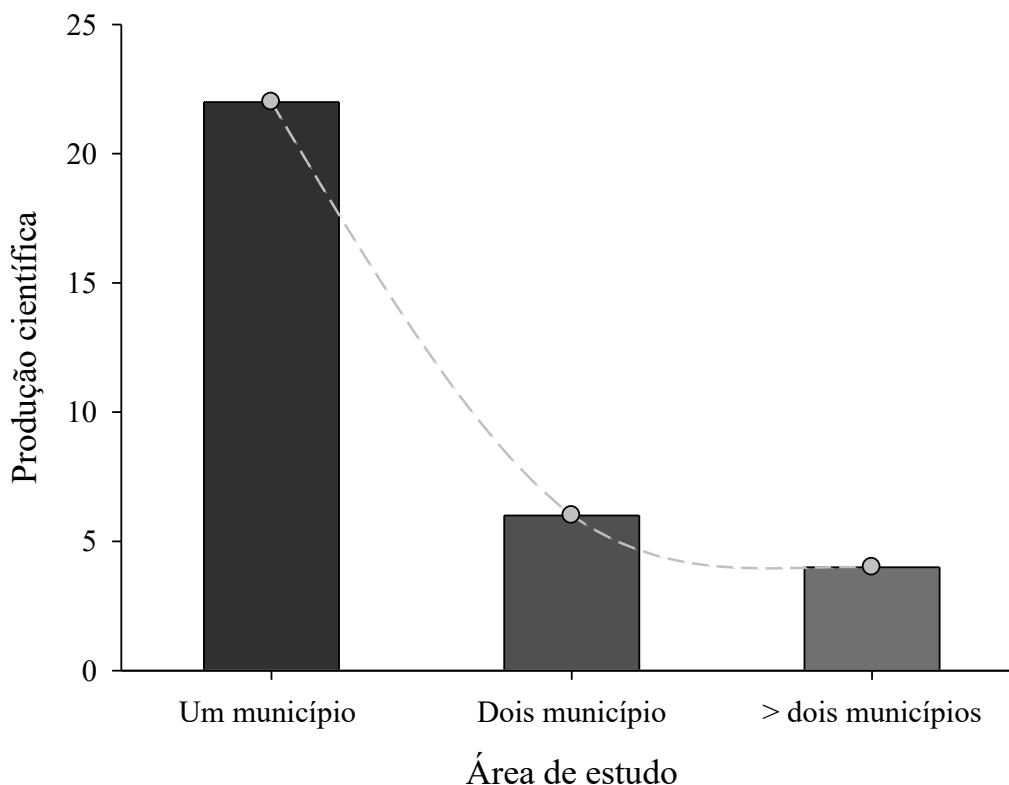


Figura 1. Quantidade de publicações em função das localidades utilizadas em amostragens de solos antropogênicos.

O município de Manicoré, localizado na região sul do Amazonas (Brasil, 1978), destacou-se por apresentar o maior número de amostragens de solo registradas em diversas publicações. Nesse contexto, identificou-se que as amostragens realizadas neste município corresponderam a 30% do total ($n = 15$), ou seja, quinze pesquisas apontaram o município na seção material e métodos, seguido, em ordem decrescente, pelos seguintes municípios de Apuí (14%, $n = 7$), Iranduba (12%, $n = 6$), Manacapuru (10%, $n = 5$), Novo Aripuanã (8%, $n = 4$), Humaitá e Manaus, ambos com 6% ($n = 3$), Rio Preto da Eva e Novo Airão, ambos com 4% ($n = 2$), e Barreirinha, Canutama, Parintins e Urucurituba, cada um com 2% ($n = 1$) (Fig. 2).

Embora a pesquisa sobre esse tema tenha sido realizada principalmente nesses treze municípios do estado do Amazonas, observa-se que a maior parte dos trabalhos envolvendo amostragens de solos antropogênicos se concentrou na região sul do estado (58%, $n = 29$). Esses trabalhos estão distribuídos em ordem decrescente nas cidades de Manicoré ($n = 15$), Apuí ($n = 7$), Novo Aripuanã ($n = 4$) e Humaitá ($n = 3$), corroborando com os achados de Silva et al. (2021a).

Gomes et al. (2017a) relataram que os trabalhos recentes na região têm empregado técnicas de interpolação de dados (geoestatística), destacando-se estudos como os de Campos et al. (2011), Oliveira et al. (2014) e Aquino et al. (2016). Essa metodologia integra dados obtidos por sensoriamento remoto, possibilitando a geração mapas digitais de alta resolução combinados com informações sobre a variabilidade espacial dos atributos do solo, além de índices digitais do terreno e dados ambientais auxiliares (pedológicos, geológicos, uso da terra e climáticos) (Ågren et al., 2021).

Na região de Manaus e municípios próximos, situados a menos de 100 km da capital (Manacapuru ~99 km, Rio Preto da Eva ~81 km e Iranduba ~36 km), observou-se a segunda maior concentração de áreas analisadas (28%, n = 14).

A evolução das pesquisas sobre a qualidade e saúde dos solos antropogênicos nessas regiões parece estar diretamente relacionada à sua alta ocorrência (Clement et al., 2015), bem como aos diversos usos e manejos identificados, como a agricultura e a pecuária extensiva. Além disso, a presença de laboratórios de análise de solo em instituições de pesquisa e universidades próximas, pode ser um fator crucial, facilitando o transporte das amostras e incentivando o envolvimento de profissionais, como pesquisadores e docentes, dessas áreas.

3.3 Indicadores de qualidade e frequência de exploração desses atributos em solos antropogênicos no Amazonas

A partir da análise das 32 publicações compiladas com os filtros estabelecidos neste trabalho, observou-se a frequência de uso dos atributos químicos, físicos e biológicos na avaliação da saúde dos solos antropogênicos (Fig. 3). Foram atribuídos valores aos modelos ou quantificações, separando as avaliações que focaram exclusivamente nos atributos químicos ou físicos do solo, com uma frequência de 46,9% (n = 15) e 37,5% (n = 12), respectivamente.

Dessa maneira, pode-se evidenciar a predominância de pesquisas que utilizam principalmente os atributos químicos do solo em comparação com uso aos atributos físicos e biológicos. Isso pode ser explicado pela alta fertilidade desses solos antropogênicos, os quais são amplamente demandados por agricultores (Teixeira et al., 2005; Kim et al., 2007). Além disso, a alta fertilidade desses solos está associada a maiores teores de matéria orgânica em comparação aos solos adjacentes (McCann

et al., 2001; Lima et al., 2002; Soares et al., 2018a) e ao elevado conteúdo de partículas de carvão resultantes da combustão incompleta (Denevan, 2009). Esses fatores podem ter influenciado a maior frequência de avaliações focadas na qualidade química desses solos.

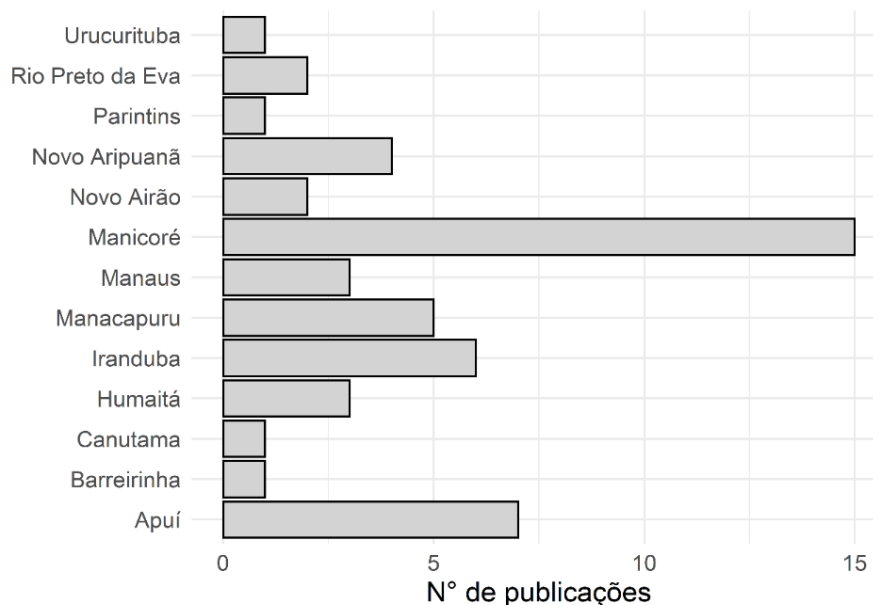


Figura 2. Publicações científicas que trataram sobre a qualidade dos solos antropogênicos no período de vinte anos (2002 a 2022) em municípios do Amazonas, Brasil.

Os resultados desta pesquisa corroboram com os reportados por Silva et al. (2021a) quando demonstraram que os estudos sobre terras antropogênicas se basearam principalmente nos atributos químicos. Nesse contexto, para esta revisão, quantificaram-se as frequências dos indicadores de qualidade, sendo possível observar, em ordem decrescente, as variáveis ou parâmetros mais utilizados para inferir a qualidade química do solo em solos antropogênicos no estado do Amazonas: pH (12,1%, $n = 21$) > P (11%, $n = 19$) = COT (11%, $n = 19$) > Ca (8,7%, $n = 15$) > Mg (8,1%, $n = 14$) > K (6,9%, $n = 12$) = H + Al (6,9%, $n = 12$), Al (6,4%, $n = 11$) > CTC (5,2%, $n = 9$) = V% (5,2%, $n = 9$) > SB (4%, $n = 7$) > N (2,9%, $n = 5$) > m% (2,3%, $n = 4$) = Zn (2,3%, $n = 4$) = Mn (2,3%, $n = 4$) = Fe (2,3%, $n = 4$) > t (1,2%, $n = 2$) > Cu (0,6%, $n = 1$) = Na (0,6%, $n = 1$) (Fig. 4).

Além disso, diversas publicações confirmam que o uso de atributos físicos do solo tem sido cada vez mais frequente ao longo do tempo, especialmente em estudos

que avaliaram a estrutura dos solos antropogênicos por meio do comportamento dos agregados do solo (Gomes et al., 2017b; Brito et al., 2018; Frozzi et al., 2020; Souza et al., 2020; Batistão et al., 2020; Soares et al., 2021). Isso ocorre porque os agregados do solo, principalmente os macroagregados, têm sido amplamente utilizados em estudos sobre a qualidade do solo e a resposta do solo ao manejo e às mudanças ambientais (Drewry et al., 2021). Nesta revisão, quantificou-se a frequência de estudos que utilizaram atributos físicos com base nas 32 publicações selecionadas. Os resultados, apresentados em ordem decrescente, indicam os seguintes percentuais: Granulometria das partículas do solo (19,6%, $n = 18$) > Ds (14,1%, $n = 13$) > Estudo dos agregados do solo (10,9%, $n = 10$) > Pt (8,7%, $n = 8$) = MaP (8,7%, $n = 8$) = MiP (8,7%, $n = 8$) > RP (6,5%, $n = 6$) = Dp (6,5%, $n = 6$) > Parâmetros de umidade do solo (4,3%, $n = 4$) > Ksat (2,2%, $n = 2$) = U_{cc} (2,2%, $n = 2$) > IHO (1,1%, $n = 1$) = CRA (1,1%, $n = 1$) = Parâmetro S (1,1%, $n = 1$) = Resistência Tênsil (1,1%, $n = 1$) = IF (1,1%, $n = 1$) = σ_p (1,1%, $n = 1$) = CSC (1,1%, $n = 1$) (Fig. 4).

3.4 Interações e lacunas no conhecimento sobre os atributos e qualidade dos solos antropogênicos

Entre os estudos analisados, 50% ($n = 6$) das pesquisas que utilizaram exclusivamente variáveis físicas do solo, correlacionaram essas variáveis com o carbono do solo. Além disso, 9,4% ($n = 3$) exploraram correlações entre atributos químicos e físicos, enquanto 6,3% ($n = 2$) analisaram a relação entre atributos químicos e biológicos para determinar ou caracterizar a qualidade de solos antropogênicos, como a Terra Preta de Índio e a Terra Mulata, conforme definido por Sombroek (1966); Denevan (2009), e Soares (2018).

Essas correlações são frequentemente realizadas quando o comportamento dos atributos do solo é avaliado em função de práticas de manejo ou mudanças no uso da terra. A análise integrada de atributos físicos e carbono do solo, por exemplo, tem se mostrado uma ferramenta eficaz para identificar os impactos de diferentes usos e práticas de manejo sobre a qualidade dos solos antropogênicos. Exemplos disso pode ser observado nos estudos Gomes et al. (2017a); Soares et al. (2018b) e Soares et al. (2021).

Embora seja amplamente reconhecido que as Terras Pretas Antropogênicas abrigam comunidades únicas de plantas e microrganismos do solo (Taketani et al.,

2013; Brossi et al., 2014), e apresentam maior biodiversidade microbiana do que solos adjacentes, como os Latossolos Amarelos (Ruivo et al., 2002), ainda há uma lacuna significativa no conhecimento sobre as comunidades da fauna desses solos (Demetrio et al., 2021).

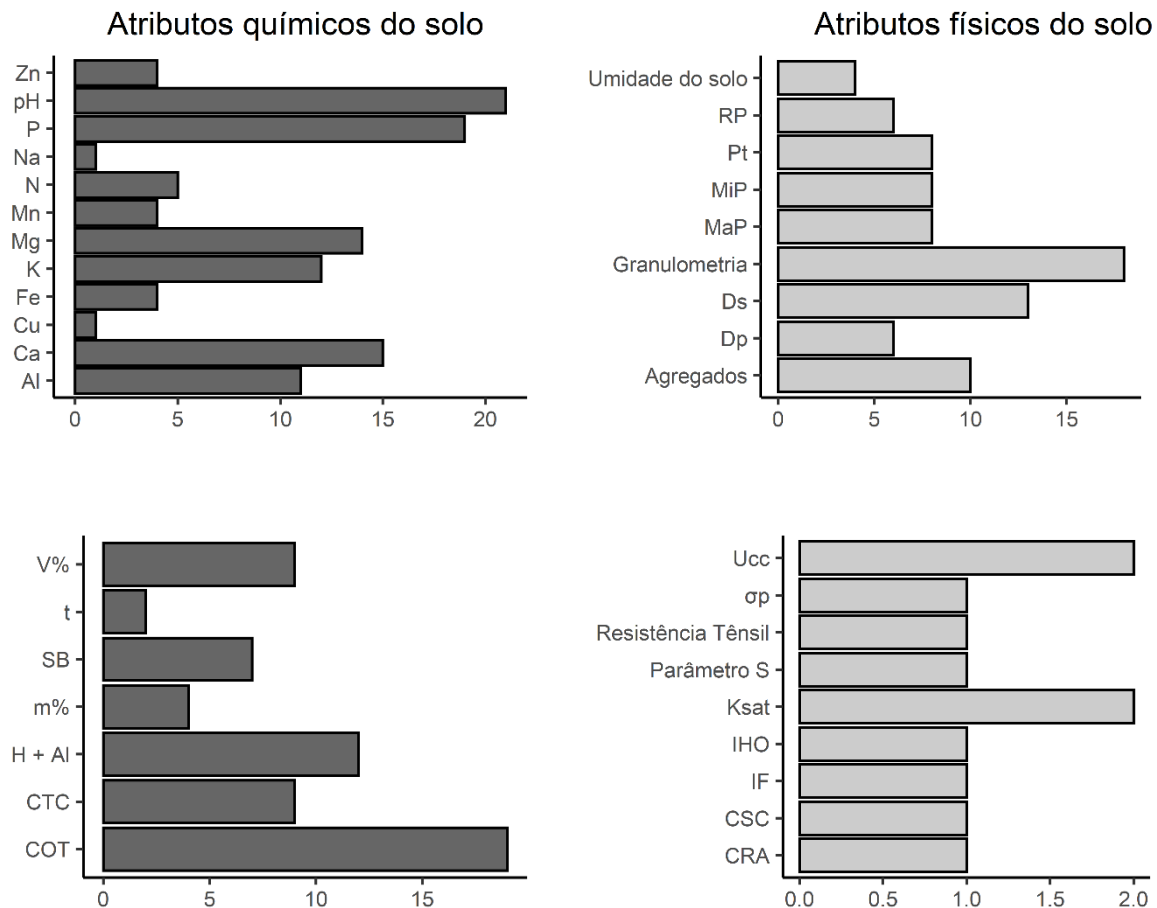


Figura 3. Frequência e tipo de análises dos atributos dos solos antropogênicos no estado do Amazonas, Brasil. Atributos químicos: H + Al = Acidez potencial; CTC = capacidade de troca catiônica; V% = Porcentagem de saturação por bases; SB = Soma de bases; t = CTC efetiva; m% = Saturação por alumínio. Atributos físicos: U_{cc} = Umidade na capacidade de campo; Ksat = Condutividade hidráulica saturada do solo; IHO = índice hídrico ótimo; CRA = Curva de retenção de água; IF = Índice de floculação; σ_p = Pressão de préconsolidação; CSC = Capacidade de suporte de carga.

Segundo Demetrio et al. (2021), apenas três estudos abordaram essa temática, todos com abrangência geográfica limitada a áreas próximas a Manaus e com foco em minhocas (Cunha et al., 2016) e artrópodes do solo (Sales et al., 2007; Soares et al., 2011). Ruivo et al., (2002) demonstraram que a biodiversidade microbiana é maior

nas Terras Pretas Arqueológicas. Assim, o estudo do conhecimento local sobre o solo e o manejo da terra em uma perspectiva ecológica na Amazônia é fundamental. As relações microbiológicas do solo são particularmente importantes para o manejo da fertilidade, e a análise integrada do passado e do presente pode fornecer recomendações valiosas para melhorar o uso e o manejo sustentável da terra na Amazônia (Lehmann e Junior, 2002; Thies e Suzuki, 2003; Winklerprins e Barrera-Bassols, 2004; Silva e Rebellato, 2004).

No entanto, entre as publicações revisadas, apenas dois estudos (6,3%) trataram diretamente dos atributos biológicos do solo, abordando a macrofauna e a população microbiana, incluindo bactérias e fungos, em solos antropogênicos (Ruivo et al., 2006).

3.5 Avanços e metodologias na avaliação da qualidade dos solos antropogênicos no Amazonas

Embora estudos recentes tenham destacado a qualidade dos solos antropogênicos com base em atributos físicos, químicos e biológicos, ainda é evidente o limitado uso de metodologias modernas, amplamente empregadas na ciência do solo para avaliar a qualidade de diferentes tipos de solos na região amazônica.

Nesse contexto, considerando os impactos da mudança no uso da terra no Amazonas, como a substituição de floresta nativa por cultivos agrícolas e pastagens, bem como o uso contínuo de áreas com solos antropogênicos, que pode levar à degradação desses ao longo do tempo, destaca-se a importância do avanço tecnológico e metodológico para a avaliação da qualidade desses solos (Terra Preta e Terra Mulata). Essas tecnologias podem ser ferramentas essenciais no planejamento do manejo agrícola e na tomada de decisões que promovam a sustentabilidade produtiva, a conservação e a longevidade dos solos, contribuindo para a preservação dos serviços ecossistêmicos desempenhados por esses pedoambientes.

Nos solos agrícolas do Amazonas, é comum o uso de preparo convencional, mesmo em solos antropogênicos, especialmente na região metropolitana de Manaus, onde a produção agrícola é facilmente direcionada à capital. Sugere-se, portanto, o uso de modelagens para avaliar a compactação nessas áreas agrícola (Dias Junior et al., 2005; Silva et al., 2009) e para determinar a capacidade de suporte de carga dos solos (CSC) no espaço, visando a conservação da qualidade estrutural desses solos.

O método da pressão de préconsolidação (σ_p) como estimativa da CSC tem sido amplamente utilizado como indicador dos impactos promovidos pelas práticas de manejo na estrutura do solo (Rücknagel et al., 2017; Awe et al., 2020; Esteban et al., 2020). A σ_p reflete a pressão máxima que pode ser aplicada ao solo sem causar compactação irreversível (Dias Junior e Pierce, 1995; Defossez e Richard, 2002; Silva et al., 2009). Pressões inferiores ao σ_p resultam em deformações elásticas, ou seja, recuperáveis, enquanto pressões superiores geram deformações plásticas, ou não recuperáveis, que indicam a susceptibilidade do solo à compactação (Horn et al., 1995; Horn e Fleige, 2003; Silva et al., 2009). Análises da CSC associadas a diferentes níveis de umidade podem determinar as condições ideais de trabalhabilidade sobre os solos antropogênicos.

Estudos recentes têm adotado uma abordagem mais integrada na avaliação dos solos, combinando indicadores físicos, que fornecem *insights* sobre a estrutura do solo, com parâmetros químicos, relacionados à fertilidade e acidez, e biológicos, que englobam microrganismos, mesofauna e macrofauna. Essa integração permite compreender melhor os impactos dos sistemas agrícolas sobre as funções essenciais do solo por meio de índices de qualidade do solo (Ramos et al., 2010; Viana et al., 2014; Di prima et al., 2018; Da luz et al., 2019; Cavalcanti et al., 2020; Santos et al., 2021). Esses índices representam uma ferramenta prática e quantitativa para avaliar os efeitos das mudanças no uso da terra sobre as funções do solo e os serviços ecossistêmicos, sendo, portanto, fundamentais para orientar agricultores e agentes públicos tomadores de decisão (Cherubin et al., 2016; Cavalcanti et al., 2020).

Os índices de qualidade, obtidos geralmente por meio de técnicas multivariadas aplicadas à análise dos atributos do solo, têm sido cada vez mais requisitados, uma vez que a degradação física do solo pode comprometer a disponibilidade de água e nutrientes, a dinâmica da matéria orgânica (MOS), as trocas gasosas (como O_2 , CO_2 e N_2O) e a atividade microbiana (Rabot et al., 2018). Esses fatores estão diretamente relacionados ao desenvolvimento e produtividade das culturas (Santos et al., 2021), bem como à saúde do solo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A produção científica sobre a qualidade dos solos antropogênicos apresentou um crescimento significativo nos últimos seis anos (2017–2022) em comparação com a década anterior (2006–2016). Na maioria das publicações analisou-se solos de áreas localizadas em apenas um município, e grande parte desses estudos concentram-se na região sul do Amazonas, com destaque para o município de Manicoré, que tem sido o foco mais recorrente no desenvolvimento de pesquisas nessa área.

O uso dos atributos químicos como indicadores de qualidade dos solos antropogênicos predomina devido à sua estreita relação com a fertilidade e o uso agrícola desses solos. Entre os indicadores químicos mais estudados, destacam-se: pH > macronutrientes > parâmetros de acidez > micronutrientes.

Nos últimos anos, os atributos físicos foram mais destacados, especialmente em estudos que analisam exclusivamente a qualidade física dos solos antropogênicos na Amazônia. Esses trabalhos enfatizam, sobretudo, a densidade do solo, estabilidade de agregados e porosidade. Além disso, a granulometria das partículas do solo foi amplamente avaliada, sendo o atributo físico mais investigado em estudos tanto de qualidade física quanto química.

Pesquisas sobre a atividade biológica nesses solos ainda são incipientes, com poucas informações disponíveis, principalmente no que diz respeito à relação entre práticas de manejo e a atividade biológica. Essa lacuna representa uma oportunidade para futuras investigações, especialmente no contexto dos impactos da mudança de uso da terra em solos antropogênicos localizados na Amazônia.

Embora o número de publicações sobre a qualidade dos solos antropogênicos tenha aumentado, ainda há uma lacuna significativa de conhecimento sobre esses solos no estado do Amazonas. Em particular, faltam estudos que relacionem a qualidade do solo com o tempo de manejo e as mudanças de uso da terra em áreas exploradas por décadas. No entanto, para solos antropogênicos manejados convencionalmente, é fundamental realizar avaliações que integrem aspectos relacionados à compactação e à capacidade de suporte de carga. Além disso, para estudos que visem compreender os impactos das mudanças no uso da terra, recomenda-se a aplicação de análises integrativas multivariada, capazes de gerar índices de qualidade do solo, que podem fornecer uma ferramenta robusta para quantificar esses efeitos na qualidade dos solos antropogênicos.

REFERÊNCIAS

- ÅGREN AM, LARSON J, PAUL SS, LAUDON H, LIDBERG W (2021) Use of multiple LIDAR-derived digital terrain indices and machine learning for high-resolution national-scale soil moisture mapping of the Swedish forest landscape. **Geoderma**, v. 404, n. June, p. 115280. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115280>
- ALHO CFBV, SAMUEL-ROSA A, MARTINS GC, HIEMSTRA T, KUYPER TW, TEIXEIRA WG (2019) Spatial variation of carbon and nutrients stocks in Amazonian Dark Earth. **Geoderma**, v. 337, n. December 2017, p. 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.040>
- AQUINO RE, CAMPOS MCC, DE OLIVEIRA IA, MARQUES JUNIOR J, SILVA DMP, SILVA DAP (2014) Variabilidade espacial de atributos físicos de solos antropogênico e não antropogênico na região de manicoré, AM. **Bioscience Journal**, v. 30, n. 4, p. 988–997.
- AQUINO RE, MARQUES J, CAMPOS MCC, OLIVEIRA IA, BAHIA ASRS, SANTOS LAC (2016) Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, v. 262, p. 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>
- AWE GO, REICHERT JM, FONTANELA E (2020) Sugarcane production in the sub-tropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 196, p. 104447. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104447>
- BATISTÃO AC, HOLTHUSEN D, REICHERT JM, SANTOS LAC, CAMPOS MCC (2020) Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, n. July 2019, p. 114130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130>
- BRASIL (1978) Ministério das Minas e Energia. **Projeto Radambrasil**, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro. 561 p.
- BRITO WBM, CAMPOS MCC, DE BRITO FILHO EG, DE LIMA AFL, CUNHA JM, DA SILVA LI, DOS SANTOS LAC, MANTOVANELLI BC (2020) Dynamics and spatial aspects of erodibility in Indian Black Earth in the Amazon, Brazil. **Catena**, v. 185, p. 104281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104281>
- BRITO WBM, COSTA CAMPOS MC, CAMPOS MANTOVANELLI B, DA CUNHA JM, FRANCISCON U, RODRIGUES SOARES MD (2018) Spatial variability of soil physical properties in Archeological Dark Earths under different uses in southern Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 182, n. May, p. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.008>
- BROSSI MJDL, MENDES LW, GERMANO MG, LIMA AB, TSAI SM (2014) Assessment of Bacterial bph Gene in Amazonian Dark Earth and Their Adjacent Soils. **Plos one**, v. 9, n. 6, p. e99597. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0099597>

CAMPOS MCC, RIBEIRO MR, SOUZA JÚNIOR VS, RIBEIRO FILHO MR, SOUZA RVCC, ALMEIDA MC (2011) Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 598–609. <https://doi.org/10.1590/s0006-87052011000300016>

CAMPOS MCC, SANTOS LAC, SILVA DMP, MANTOVANELLI BC, SOARES MDR (2012) Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **REVISTA AGRO@MBIENTE ONLINE**, v. 6, n. 2, p. 102. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v6i2.682>

CAVALCANTI RQ, ROLIM MM, DE LIMA RP, TAVARES UE, PEDROSA EMR, CHERUBIN MR (2020) Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. **Geoderma**, v. 370, n. February, p. 114353. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>

CHAGAS LFB, FALCÃO NPS, PADILHA FJ, OLIVEIRA DM, GUIMARÃES RS, DE CAMPOS DVB, WALVERDE EM, FERREIRA PHZ, SOARES R (2017) Evaluation of the impact of citrus cultivation on carbon and nitrogen stocks of light organic matter fractions of amazonian dark earth (ADE) and surrounding soils (Oxisoil) from central Amazonia. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 5, p. 2067–2081. <https://doi.org/10.21577/1984-6835.20170123>

CHERUBIN MR, KARLEN DL, FRANCO ALC, TORMENA CA, CERRI CEP, DAVIES CA, CERRI CC (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, n. 2016, p. 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

CLEMENT CR, DENEVAN WM, HECKENBERGER MJ, JUNQUEIRA AB, NEVES EG, TEIXEIRA WG, WOODS WI (2015) The domestication of Amazonia before European conquest. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 282, n. 1812. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2015.0813>

CULTRERA M, CHRISTINA MAM, FERREIRA FC (2012) Agricultura urbana e conservação de agrobiodiversidade: um estudo de caso em Mato Grosso, Brasil. **Sitientibus série Ciências Biológicas**, v. 12, n. 2, p. 323–332.

CUNHA JM, CAMPOS MCC, GAIO DC, DE SOUZA ZM, SOARES MDR, DA SILVA DMP, SIMÕES EL (2018) Spatial variability of soil respiration in Archaeological Dark Earth areas in the Amazon. **CATENA**, v. 162, p. 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.001>

CUNHA JM, GAIO DC, COSTA CMC, RODRIGUES SMD, PINHEIRO SDM, LEITE LAF (2017) Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 12, n. 2, p. 263. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1890>

CUNHA L, BROWN GG, STANTON DWG, DA SILVA E, HANSEL FA, JORGE G, MCKEY D, VIDAL-TORRADO P, MACEDO RS, VELASQUEZ E, JAMES SW, LAVELLE P, KILLE P (2016) Soil animals and pedogenesis: The role of earthworms in anthropogenic soils. **Soil Science**, v. 181, n. 3–4, p. 110–125. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000144>

CUNHA TJF, MADARI BE, CANELLAS LP, RIBEIRO LP, BENITES VM, SANTOS G. DEA (2009) Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. **Rev Bras Cienc Solo** 33, 85–93. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100009>

DA LUZ FB, DA SILVA VR, KOCHER MFJ, BONINI PCA, DEBIASI H, FRANCHINI JC, CHERUBIN MR (2019) Monitoring soil quality changes in diversified agricultural cropping systems by the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 281, n. May, p. 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.05.006>

DEFOSSEZ P, RICHARD G (2002) Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. **Soil and Tillage Research**, v. 67, n. 1, p. 41–64. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(02\)00030-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(02)00030-2)

DEMETRIO WC et al. (2021) A “Dirty” Footprint: Macroinvertebrate diversity in Amazonian Anthropogenic Soils. **Global Change Biology**, v. 27, n. 19, p. 4575–4591. <https://doi.org/10.1111/gcb.15752>

DENEVAN (2009) As Origens Agrícolas da Terra Mulata na Amazônia. In: TEIXEIRA, W. G. et al. As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. 1. ed. Manaus: **Embrapa Amazônia Ocidental**. p. 82 - 86.

DI PRIMA S, RODRIGO-COMINO J, NOVARA A, IOVINO M, PIRASTRU M, KEESSTRA S, CERDÀ A (2018) Soil Physical Quality of Citrus Orchards Under Tillage, Herbicide, and Organic Managements. **Pedosphere**, v. 28, n. 3, p. 463–477. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60025-6](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60025-6)

DIAS JUNIOR MS, LEITE FP, LASMAR JÚNIOR E, ARAÚJO JUNIOR CF (2005) Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Scientia Agricola**, v. 62, n. 3, p. 248–255. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300008>

DIAS JUNIOR MS, PIERCE FJA (1995) A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, v. 8, n. 2, p. 139–151. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00015-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00015-8)

DREWRY JJ, CAVANAGH J-AE, MCNEILL SJ, STEVENSON BA, GORDON DA, TAYLOR MD (2021) Long-term monitoring of soil quality and trace elements to evaluate land use effects and temporal change in the Wellington region, New Zealand. **Geoderma Regional**, v. 25, p. e00383. <https://doi.org/10.1016/J.GEODRS.2021.E00383>

EDWARDS G, WHITE DR, MUNKHOLM LJ, SØRENSEN CG, LAMANDÉ M (2016) Modelling the readiness of soil for different methods of tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.08.013>

ESTEBAN DAA, DE SOUZA ZM, DA SILVA RB, DE SOUZA LE, LOVERA LH, DE OLIVEIRA IN (2020) Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma**, v. 362, p. 114097, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>

FALCÃO NPS, BORGES LF (2006) Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão hawaí (*Carica papaya* L.) 1 production of papaya (*Carica papaya* L.) in Central Amazonia. **Acta Amazônica**, v. 36, n. 4, p. 401–406.

FRASER J, TEIXEIRA W, FALCÃO N, WOODS W, LEHMANN J, JUNQUEIRA AB (2011) Anthropogenic soils in the Central Amazon: From categories to a continuum. **Area**, v. 43, n. 3, p. 264–273. <https://doi.org/10.1111/j.1475-4762.2011.00999.x>

FROZZI JC, DA CUNHA JM, CAMPOS MCC, BERGAMIN AC, BRITO WBM, FRANCISCON U, DA SILVA DMP, DE LIMA AFL, DE BRITO FEG (2020) Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 11, p. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08948-x>

GLASER B (2007) 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, n. 1478, p. 187–196. <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstb.2006.1978>

GLASER B; BIRK JJ (2012) 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. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1978>

GOMES RP, CAMPOS MCC, SOARES MDR, SILVA DMP, CUNHA JM, FRANCISCON U, SILVA LS, OLIVEIRA IA, BRITO WBM (2017a) Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses of indian black earth in southern Amazonas. **Bioscience Journal**, v. 33, n. 6, p. 1513–1522. <https://doi.org/10.14393/BJ-v33n6a2017-37142>

GOMES RP, et al. (2017b) Variabilidade espacial de agregados e carbono orgânico sob três diferentes usos de terra preta de índio no sul do Amazonas. **Scopus**, v. 33, n. 6, p. 1513–1522.

HORN R, et al. (1995) Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil Till. Res.** 35, 233–243.

HORN R; FLEIGE H (2003) A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. **Soil Till. Res.** 73, 89–99.

KERN DC, KÄMPF N (1989) Antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 219-225.

KIM JS, SPAROVEK G, LONGO RM, DE MELO WJ, CROWLEY D (2007) Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.010>

LEHMANN J, JR JDS (2002) Slash-and-char-a feasible alternative for soil fertility management in the central Amazon. ... **Congress of Soil ...**, n. 13, p. 1–12. [http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/Lehmann et al., 2002, WCSS Bangkok, paper no.0449.pdf](http://www.css.cornell.edu/faculty/lehmann/publ/Lehmann%20et%20al.,%202002,%20WCSS%20Bangkok,%20paper%20no.0449.pdf)

LIMA AC, MILTON S, LAÉRCIO F, ELILSON C, MANTOVANELLI J, OLIVEIRA BF (2021) Spatial Behavior of Soil Chemical Attributes In An Area of Black Indian Soil With Pasture Cultivation. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 14. 2523-2533. DOI: 10.26848/rbgf.v14.5.p2523-2533

LIMA AFL, CAMPOS MCC, DA CUNHA JM, SILVA LS, DE OLIVEIRA FP, MANTOVANELLI BC, DE BRITO FEG, GOMES RP (2019) Spatial variability and sampling density of chemical attributes in archaeological black earths under pasture in southern Amazonas, Brazil. **SOIL Discussions**, n. June, p. 1–17. <https://doi.org/10.5194/soil-2019-26>

LIMA HN, SCHAEFER CER, MELLO JWV, GILKES RJ, KER JC (2002) Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00141-6)

MANTOVANELLI BC, ALHO LC, CAMPOS MCC, CUNHA JM, OLIVEIRA IA (2020) Pedoindicators attributes in the variation of CO₂ efflux in Indian black earth and non-anthropogenic soils. **Carbon Management**, v. 11, n. 5, p. 511–523. <https://doi.org/10.1080/17583004.2020.1813479>

MCCANN JM, et al. (2001) Organic matter and Anthrosol in Amazonia: Interpreting the Amerindian Legacy. In: REES, R. M. et al (Ed.) Sustainable management of soil organic matter. **Wallingford**: CAB International. Cap.189. p.180.

MCMICHAEL CH, PALACE MW, BUSH MB, BRASWELL B, HAGEN S, NEVES EG, SILMAN MR, TAMANAHA EK, CZARNECKI C (2014) Predicting pre-Columbian anthropogenic soils in Amazonia. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 281, n. 1777, p. 20132475. <https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2475>

MOLINE EFV (2016) Formas de fósforo, substâncias húmicas e nitrogênio inorgânico em áreas da Amazônia Ocidental. 1–69 f. - **Universidade Estadual Paulista**, Jaboticabal.

MOREIRA A (2007) Fertilidade, Matéria Orgânica E Substâncias Húmicas Em Solos Antropogênicos da Amazônia Ocidental. **Bragantia**, v. 66, n. 2, p. 307–315.

NEVES JUNIOR AF (2008) Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central. 94 f. - **Universidade de São Paulo**.

OLIVEIRA IA, et al. (2017) Multivariate technique for determination of soil pedoenviromental indicators in Southern Amazonas. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 39, n. 1, p. 99.

OLIVEIRA IA, MARQUES JÚNIOR J, CAMPOS MCC, AQUINO R, SIQUEIRA DS, FREITAS L (2014) Spacial variability and sampling density of chemical attributes in archaeological black earth and native forest soil in Manicoré, AM. **FLORESTA**, v. 44, n. 4, p. 735. <https://doi.org/10.5380/rf.v44i4.29988>

RABOT E, WIESMEIER M, SCHLÜTER S, VOGEL H-J (2018) Soil structure as an indicator of soil functions: A review. **Geoderma**, v. 314, p. 122–137, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009>

RAMOS FT, MONARI YC, NUNES MCM, CAMPOS TS, RAMOS DT (2010) Indicadores De Qualidade Em Um Latossolo Vermelho-Amarelo, v. 2125, p. 112–120.

RÜCKNAGEL J, et al. (2017) Uniaxial compression behaviour and soil physical quality of topsoils under conventional and conservation tillage. **Geoderma**, v. 286, p. 1-7.

RUIVO MLP, et al. (2002) População Microbiana em Solo de Terra Preta Arqueológica: um indicativo da qualidade do solo? **Resumos expandidos do Congresso Brasileiro de Geoquímica**, Belém, p. 232 – 233.

RUIVO MLP, OLIVEIRA ML, LOPES ELN, AMARANTE CB, GONÇALVES MF, COSTA RR, GUIMARÃES B (2006) Population and biodiversity in amazon dark earths soils. In: RIOS, G. M; CAMARGO, S. M. Pueblos y Paisajes antiguos de la Selva Tropical Amazónica. Colombiana: Universidade Nacional da Colombia, Bogotá-Tara-Xacum/Washington. p. 284-291.

SALES RS, MARILYN L, KRIGER D' M, ANTONY2 A, JOSÉ, VILHENA M (2007) Biodiversidade e dinâmica da macrofauna edáfica da terra preta de índio em sítios da Amazônia Central.

SANTOS LAC, CAMPOS MCC, DE AQUINO RE, BERGAMIN AC, DA SILVA DMP, MARQUES JUNIOR J, FRANÇA ABC (2013) Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 825–836. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400001>

SANTOS RS, WIESMEIER M, CHERUBIN MR, OLIVEIRA DMS, LOCATELLI JL, HOLZSCHUH M, CERRI CEP (2021) Consequences of land-use change in Brazil's new agricultural frontier: A soil physical health assessment. **Geoderma**, v. 400, n. March, p. 115149.

SILVA FA, REBELLATO L (2004) Use of space and formation of Terra Preta: The Asurini do Xingu case study. **Amazonian Dark Earths: explorations in space and time**, p. 159-167.

SILVA JJC, CAMPOS MCC, BRITO FILHO EG, BRITO WBM, LEITE AFL, SIMÕES EL, CUNHA JM, OLIVEIRA FP (2021a) Impact of different crops on the spatial variability of the chemical attributes of Indian black earth in Southern Amazonas. **Bragantia**, v. 80. <https://doi.org/10.1590/1678-4499.20210131>

SILVA LCR, CORRÊA RS, WRIGHT JL, BOMFIM B, HENDRICKS L, GAVIN DG, MUNIZ AW, MARTINS GC, MOTTA ACV, BARBOSA JZ, MELO VF, YOUNG SD, BROADLEY MR, SANTOS RV (2021b) A new hypothesis for the origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, p. 127. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20184-2>

SILVA RB, LANÇAS KP, MIRANDA EEV, SILVA FAM, BAIO FHR (2009) Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State - Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 2, p. 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.018>

SIMON CP, GOMES TF, PESSOA TN, SOLTANGHEISI A, BIELUCZYK W, CAMARGO PB, MARTINELLI LA, CHERUBIN MR (2022) Soil quality literature in Brazil: A systematic review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46, p. 1–21. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20210103>

SMITH NJH (1980) Anthrosol and human carrying capacity in Amazonia. In: **Annals of the Association of American Geographers**, 70. 1980. Durham, Anais... Durham, p. 553-566.

SOARES MDR (2018) Atributos do solo em Terras Pretas Arqueológicas sob diferentes usos. 121 f. - **Universidade Estadual de Campinas**.

SOARES MDR, CAMPOS MCC, CUNHA JM, SOUZA ZM, OLIVEIRA IA, AQUINO RE, MANTOVANELLI BC, OLIVEIRA LS (2018b) Variabilidade espacial do estoque de carbono e atributos físicos do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 6, p. 1. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOARES MDR, Campos MCC, CUNHA JM, WECKNER FC, BRITO FILHO E, MANTOVANELI BC, et al. (2018a) Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia** 12: 125–133. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOARES MDR, DE SOUZA ZM, CAMPOS MCC, DA SILVA RB, ESTEBAN DAA, NORONHA RL, DOS SANTOS GMG, DA CUNHA JM (2021) Land-use change and its impact on physical and mechanical properties of Archaeological Black Earth in the Amazon rainforest. **CATENA**, v. 202. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105266>

SOARES MDR, SOUZA ZM, CAMPOS MCC, COOPER M, TAVARES RLM, LOVERA LH, FARHATE CVV, CUNHA JM (2022) Physical Quality and Porosity Aspects of Amazon Anthropogenic Soils under Different Management Systems. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2022, p. 1–9. <https://doi.org/10.1155/2022/6132322>

SOMBROEK W, et al. (2006) Amazonian Dark Earths as Carbon Stores and Sinks. Em: **Amazonian Dark Earths**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 125–139.

SOMBROEK WG (1966) Amazon soil: a reconnaissance of the soils the Brazilian Amazon region. **Wageningen**: Centre for Agricultural Publications and Documentation.

SOUZA FG, CAMPOS MCC, PINHEIRO EN, LIMA AFL, BRITO FILHO EG, CUNHA JM, SANTOS EAN, BRITO WBM (2020) Aggregate stability and carbon stocks in Forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil. **Carbon Management**, v. 11, n. 1, p. 81–96. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1694355>

SOUZA KW, LIMA HN, SCHAEFER CEGR, TEIXEIRA WG, PULROLNIK K, CORRÊA GR (2009) Phosphorous forms in cultivated indian black earth (anthrosols) of varying texture in the brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1347–1355. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500027>

SOUZA WB (2012) Terra preta de índio na região amazônica. **Scientia Amazonia**, v. 1, n. 1, p. 1–8.

TAKETANI RG, LIMA AB, DA CONCEIÇÃO JE, TEIXEIRA WG, TIEDJE JM, TSAI SM (2013) Bacterial community composition of anthropogenic biochar and Amazonian anthrosols assessed by 16S rRNA gene 454 pyrosequencing. **Antonie van Leeuwenhoek** **2013** **104**:2, v. 104, n. 2, p. 233–242. <https://doi.org/10.1007/S10482-013-9942-0>

TEIXEIRA WG, et al. (2005) As Terras Pretas de Índio no Distrito Agropecuário da Suframa. **Suframa**. Manaus, p.1-13.

TEIXEIRA WG, et al. (2009b) As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas. **1. ed. Manaus**. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/684554>

TEIXEIRA WG, MARTINS GC (2006) Caracterização das Terras Pretas de Índio da área do Distrito Agropecuário da SUFRAMA: Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Pedologia. **Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Agropecuário da Suframa**. Manaus: CPRM. P. 1-8.

TEIXEIRA WG, MARTINS GC, MACEDO RS, JUNIOR AFN, MOREIRA A, BENITES VDM, STEINER C (2009a) As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das terras pretas de índio da Amazônia Central. **CD Book As Terras Pretas**, n. 1965, p. 242–250

THIES J, SUZUKI K (2003) Amazonian Dark Earth Biological Measurements. In: LEHMANN J, KERN DC, GLASER B, WODOS WI (eds) Amazonian Dark Earths. **Springer**, Dordrecht.

VIANA RM, FERRAZ JBS, NEVES AF, VIEIRA G, PEREIRA BFF (2014) Soil quality indicators for different restoration stages on Amazon rainforest. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.005>

WATLING J, SHOCK MP, MONGELÓ GZ, ALMEIDA FO, KATER T, DE OLIVEIRA PE, NEVES EG (2018) Direct archaeological evidence for Southwestern Amazonia as an early plant domestication and food production centre. **PLOS ONE**, v. 13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199868>

WINKLERPRINS ANTOINETTE MGA; BARRERA-BASSOLS N (2004) Latin American ethnopedology: a vision of its past, present, and future. **Agriculture and human values**, v. 21, p. 139-156.

WOODS WI, et al. (2009) **Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek' s Vision**. DOI:10.1007/978-1-4020-9031-8

CAPÍTULO 3 – PRÁTICAS AGRÍCOLAS DE PEQUENOS PRODUTORES ALTERAM A QUALIDADE FÍSICA E ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA CENTRAL BRASILEIRA?

RESUMO – Os solos antropogênicos são altamente férteis e têm sido amplamente explorados por comunidades ribeirinhas descendentes indígenas, e por pequenos e médios agricultores da região metropolitana de Manaus. O uso indiscriminado desses solos, associado ao avanço das práticas convencionais de preparo da terra, ao longo do tempo, pode promover redução da saúde físico-estrutural e reduzir os estoques de carbono e nitrogênio em Terras Pretas da Amazônia (TPA), bem como em Terras Mulatas (TM). Este estudo investigou os impactos de diferentes práticas agrícolas sobre a saúde físico-estrutural, e os estoques de carbono e nitrogênio em solos antropogênicos explorados por pequenos agricultores da Amazônia Central brasileira. Foram analisados solos de dois sítios arqueológicos sob distintos sistemas de uso em uma faixa contínua de TPA e em uma TM: I) remanescente de floresta nativa preservada, II) quintal agroflorestal, III) cultivo convencional de mamão em TPA, VI) pomar de citros em TPA, e cultivo convencional de mamão em TM. Amostras deformadas e indeformadas foram coletadas em três camadas do solo (0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m) para determinar a granulometria das partículas solo, os índices de estabilidade de agregados, a densidade do solo, os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) e seus respectivos estoques. Os resultados indicam que o uso intensivo do solo promoveu maior degradação física e reduziu significativamente os estoques de C e N, enquanto os quintais agroflorestais e áreas preservadas demonstraram maior resiliência e estabilidade estrutural. A preservação da floresta nativa e a adoção de práticas sustentáveis são essenciais para a manutenção da saúde dos solos antropogênicos e para o sequestro de C, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. O estudo reforça a necessidade de práticas agrícolas que minimizem o impacto negativo sobre esses solos únicos e historicamente importantes.

Palavras-chave: Antrossolos, Horizonte antropogênico, Práticas mecânicas do solo, Terra Preta Arqueológica, Uso tradicional da terra

CHAPTER 3 – DO THE AGRICULTURAL PRACTICES OF SMALL-HOLDERS ALTER THE PHYSICAL QUALITY AND THE CARBON AND NITROGEN STOCKS OF ANTHROPOGENIC SOILS OF THE CENTRAL BRAZILIAN AMAZON?

ABSTRACT – Anthropogenic soils are highly fertile and have been extensively exploited by indigenous-descendant riverine communities and small- and medium-scale farmers in the metropolitan region of Manaus. The indiscriminate use of these soils, combined with the expansion of conventional land preparation practices over time, can lead to a decline in physical-structural health and reduce carbon and nitrogen stocks in Amazonian Dark Earths (ADE) as well as in Brown Soils (BS). This study investigated the impacts of different agricultural practices on the physical-structural health and carbon and nitrogen stocks of anthropogenic soils cultivated by small farmers in the Central Brazilian Amazon. Soils from two archaeological sites under distinct land-use systems were analyzed in a continuous strip of ADE and in an MS: (i) preserved native forest remnant, (ii) agroforestry homegarden, (iii) conventional papaya cultivation in ADE, (iv) citrus orchard in ADE, and (v) conventional papaya cultivation in MS. Disturbed and undisturbed soil samples were collected at three depths (0.00–0.10 m, 0.10–0.20 m, and 0.20–0.30 m) to determine particle size distribution, aggregate stability indices, soil bulk density, and carbon (C) and nitrogen (N) contents and stocks. The results indicate that intensive soil use led to greater physical degradation and significantly reduced C and N stocks, whereas agroforestry homegardens and preserved areas exhibited higher resilience and structural stability. The preservation of native forests and the adoption of sustainable practices are essential for maintaining the health of anthropogenic soils and enhancing C sequestration, contributing to climate change mitigation. This study reinforces the need for agricultural practices that minimize the negative impact on these unique and historically significant soils.

Keywords: Anthrosols, Anthropogenic horizon, Soil mechanical practices, Archaeological Dark Earth, Traditional land use

1 INTRODUÇÃO

Os solos antropogênicos (SA) da Amazônia são pedoambientes com ocorrência de horizonte A antrópico em seu perfil, mundialmente conhecidos como Terra Preta de Índio (TPI), Terra Preta amazônica ou Terra Preta Arqueológica (TPA), e Terra Mulata (TM) (Sombroek et al., 2006; Denevan, 2009). Oriundos de assentamentos indígenas na Amazônia há centenas e até milhares de anos (Smith 1980; Lombardo et al., 2022), esses solos são apontados, desde algumas décadas passadas, como modelo para sustentabilidade agrícola (Glaser, 2007; Glaser; Birk, 2012). Isso se deve às suas características benéficas inerentes à saúde do solo, que são substancialmente diferentes das encontradas em horizontes minerais de solos não antrópicos (SNA).

Para além da qualidade de alguns atributos físicos, hídricos, e químicos do solo (Teixeira e Martins, 2003), essas terras destacam-se pela capacidade de mitigar emissões de gases de efeito estufa e de estocar carbono nos horizontes superficiais (Novotny et al., 2009). Os solos antropogênicos são pedoambientes sustentáveis, sobretudo porque mantêm grandes quantidades de carbono estocado (Woods e McCann, 1999; Batistão et al., 2020).

As TPA, por exemplo, são ambientes estratégicos no combate às mudanças climáticas (Glaser, 2007; Lal, 2009), uma vez que a capacidade de estocar carbono e nitrogênio (acima de 40%) é superior, quando comparados a solos minerais utilizados como referência (Ramalho et al., 2022). A alta fertilidade das TPA tem sido relacionada às maiores quantidades de material orgânico estável em comparação a outros solos adjacentes (Batistão et al., 2020; Cunha et al., 2018). Por esse motivo, na Amazônia Central, a ocupação de sítios arqueológicos com presença de SA por agricultores, tem como principal finalidade, cultivos intensivos de espécies frutícolas, como mamão e laranja (Teixeira et al., 2005; Kim et al., 2007) .

Em contraponto ao sistema extensivo dos SA, estão os Quintais Agroflorestais (QA). Trata-se de um sistema tradicional de uso da terra que reúne diferentes espécies de plantas, e presença de pequenos animais próximos às moradias humanas (Cultrera et al., 2012), e que desempenham importantes papéis sociais, sobretudo, a produção de alimentos para consumo familiar nas comunidades “caboclas” ribeirinhas (Rayol e Miranda, 2019).

O estudo da qualidade e ou saúde do solo, em consequência de mudanças do uso da terra (MUT), tem adquirido destaque global em pesquisas científicas, cujo objetivo tem sido detectar os impactos causados sobre os indicadores de qualidade do solo, em função das diversas formas de ocupação, uso, e manejo nos solos, principalmente frente à expansão agrícola (Cherubin et al., 2016b; González et al., 2024). Em países de clima tropical, esses estudos têm apresentado um crescimento significativo (Rodrigues et al., 2021). No entanto, no que se refere aos solos antropogênicos da Amazônia, eles ainda são, em sua maioria, restritos à qualificação e quantificação de indicadores químicos do solo (pH, condutividade elétrica, nitrogênio e fósforo). Essa abordagem é compreensível, dada a expressiva fertilidade dos horizontes A antrópicos (Ribeiro et al., 2023).

Em revisão sobre o tema, está claro, que nas últimas duas décadas, apesar de discretas, as pesquisas sobre a qualidade física do solo em terras antropogênicas se limitam à caracterização granulométrica das partículas do solo, aos atributos dependentes da relação massa e volume do solo, e excepcionalmente aos agregados do solo (Brito et al., 2018; Campos et al., 2011; Santos et al., 2013; Ribeiro et al., 2023). Nota-se que grande parte das pesquisas tiveram como objetivo, avaliar apenas as características dos solos de origem antrópica em comparação aos solos adjacentes, ou solos não antrópicos, desconsiderando o impacto da ocupação humana e o avanço nas práticas e manejo da terra, como a mecanização no preparo do solo, entre outros. Este quadro é extremamente preocupante quando pesquisas recentes sinalizam que os solos antropogênicos da Amazônia estocam cerca de 80% a mais carbono em relação a solos adjacentes (Alho et al., 2019; Schellekens et al., 2017; Ramalho et al., 2022).

A busca por indicadores que melhor expliquem ou permitam prever o impacto das mudanças decorrentes do uso e ocupação do solo em sítios antropogênicos, capazes de identificar estratégias de manejo adequadas, ainda representa um desafio para os cientistas da ciência do solo. É fundamental a utilização de métodos ou técnicas que possibilitem o agrupamento das diversas variáveis do solo em resposta aos impactos causados pela MUT, especialmente em solos antropogênicos da Amazônia brasileira.

É fato que a MUT tem causado degradação da qualidade física e química dos solos antropogênicos (Brito et al., 2018; Frozzi et al., 2020, Carvalho et al., 2018).

Entretanto, é necessário qualificar esse impacto, buscando relação entre os diferentes tipos de uso, manejo e níveis tecnológicos dos produtores, com o grau e tipo de degradação sobre o horizonte antropogênico. Nesse contexto, alerta-se para a necessidade de mais pesquisas sobre esses possíveis impactos nos solos antropogênicos da Amazônia. A temática converge com as metas dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS, 2, 3 e 15), as quais buscam promover a segurança alimentar e uma agricultura sustentável, assim como o enfrentamento da degradação do solo (IPCC, 2019).

A hipótese deste trabalho é que a mudança do uso da terra de florestas nativas para áreas agrícolas, resulta na redução da saúde física do solo, e consequentemente, na diminuição da capacidade do solo em acumular e estocar C e N ao longo do tempo; que o maior impacto é esperado em agrossistemas frutícolas ao contrário do que promove os Quintais Agroflorestais. Assim, o objetivo deste estudo foi quantificar o impacto da ocupação e de diferentes tipos de uso e práticas agrícolas, sobre a qualidade físico-estrutural e estoques de carbono e nitrogênio de solos antropogênicos, explorados por comunidades tradicionais e pequenos produtores, em dois sítios arqueológicos da Amazônia Central.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição e características da área de estudo

O estudo foi conduzido na Amazônia Central brasileira, no município de Manacapuru ($3^{\circ}17'22,98''\text{S}$ $60^{\circ}37'54,85''\text{O}$), localizado a 34 m acima do nível do mar (Fig. 1). De acordo com a classificação Köppen, o clima do município é classificado como Af, com temperaturas médias variando de 27,8 a 26,1°C e precipitação média anual de 2.648 mm, sendo o período mais seco de maio-novembro, e o período mais chuvoso de dezembro-abril (Alvares et al., 2013). A pesquisa considerou cinco *plots* experimentais sobre dois sítios arqueológicos. O primeiro sítio está localizado às margens do Rio Amazonas ($3^{\circ}18'18,5''\text{S}$ $60^{\circ}29'26,29''\text{W}$), na comunidade Costa do Laranjal, e o segundo localiza-se às margens do Rio Manacapuru ($3^{\circ}14'42,62''\text{S}$ $60^{\circ}41'08,98''\text{W}$), na comunidade Conceição II, distanciados a 23 km, e ambos circunscritos numa área total de 843 km² (Fig. 1). O solo de ambos os sítios arqueológicos

foram classificados como Antrossolos, conforme o sistema da IUSS Working Group WRB (2014).

Os tratamentos definidos para esta pesquisa (Tab. 1; Fig. 1), correspondem aos principais sistemas de uso da terra, comumente adotado pelas comunidades de agricultores tradicionais e ribeirinhos da Amazônia Central:

I) Remanescente de floresta nativa sobre Terra Preta Amazônica, com cobertura vegetal primária e porte variado de espécies, preservada há mais de 100 anos (VN-TPA);

II) Quintal agroflorestal sobre Terra Preta Amazônica, com cobertura vegetal remanescentes de floresta amazônica em porte variado consorciado com culturas frutícolas cultivadas aleatoriamente (mangueira, cupuaçuzeiro, cacauzeiro), com presença de pequenos animais e moradias, em uso tradicional por uma família de ribeirinhos descendentes de indígenas há 90 anos, sem a prática de revolvimento do solo (QA-TPA);

III) Área com plantio de Mamão (*Carica papaya* L.) variedade Calimosa, sobre Terra Preta Amazônica, com rotação de culturas (mamão – banana - milho) e práticas convencionais de preparo do solo, incluindo subsolagem e colheita mecanizada, utilizando trator Yanmar Agritech 1175S (3.431 kg). A adubação é realizada com aplicação média de 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de composto orgânico formulado à base de esterco de galinha. A área está em uso há 35 anos (CC-TPA);

IV) Área com pomar de citros em sistema de monocultivo sobre Terra Preta Amazônica, em uso há 43 anos, caracterizada pelo plantio de Laranja-pera (*Citrus sinensis*), com capinas constantes para o combate das plantas indesejadas, sem adubação e sem revolvimento do solo (PC-TPA);

V) Área com plantio de Mamão (*Carica papaya* L.) variedade Calimosa, sobre Terra Mulata, com sistema de rotação de culturas (mamão – pimenta malagueta) e práticas convencionais de preparo do solo, incluindo grade aradora, grade niveladora e colheita mecanizada, utilizando trator Agrale 5075,4 (3220 kg). A adubação é realizada com aplicação média de 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de composto orgânico formulado à base de esterco de galinha. A área está em uso há 20 anos (CC-TM).



Figura 1. Localização da área de estudo em sítios arqueológicos da Amazônia Central brasileira. Remanescente de floresta nativa em terra preta (VN-TPA), quintal agroflorestal em terra preta (QA-TPA), plantio de mamão em terra preta (CC-TPA), pomar de citros em terra preta (PC-TPA), plantio de mamão em terra mulata (CC-TM). As fotos foram tiradas em dezembro de 2023, e a imagem da localização dos sítios arqueológicos foi adquirida utilizando o Google Earth Pro.

2.2 Amostragem e análise do solo

Os efeitos dos tratamentos foram avaliados em amostras de solo coletadas nas seguintes camadas: 0,00 – 0,10, 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,30 m. Em cada tratamento foram abertas quatro trincheiras de dimensões 1,5 m x 1,0 m x 0,40 m distanciadas a 20 m. Nos tratamentos com plantios frutícolas, a amostragem ocorreu entre as linhas de cultivo. Toda etapa de amostragem do solo foi realizada em dezembro de 2023.

A coleta de amostras com estrutura preservada foi feita com auxílio de cilindros volumétricos de aproximadamente 100 cm³, os quais foram utilizadas para determinação da densidade do solo (Ds). Adicionalmente, torrões de solo com dimensões 0,40 x 0,40 x 0,10 m, também foram coletados, e no laboratório foram secos ao ar, fragmentados, passados e retidos, respectivamente nas peneiras de 9,51 mm, 4,75 mm de diâmetro e 2,00 mm de diâmetro, objetivando à avaliação da estabilidade de agregados. O material de solo excedente, retido na peneira de 2,00 mm, foi encaminhado para análise granulométrica.

A granulometria das partículas do solo foi determinada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico, e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 10 minutos. A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte calculado pela diferença entre a argila total e areia total. A argila dispersa em água (ADA) seguiu o mesmo método, porém sem a adição de NaOH, e em seguida, com os teores de argila total (AT) e argila dispersa em água (ADA), foi calculado o índice de floculação (IF). A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do cilindro volumétrico. Todos os procedimentos seguiram os métodos propostos pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa (Teixeira et al., 2017).

A estabilidade de agregados foi determinada pelo método do peneiramento úmido, utilizando um conjunto de peneiras com as seguintes classes de diâmetros: 4,76 mm, 2,0 mm, 1,0 mm, 0,25 mm, 0,105 mm e < 0,105 mm (Kemper e Chepil, 1965). Os resultados foram expressos em percentagem de agregados estáveis nas classes > 2 mm, 2 – 1 mm, e < 1 mm de diâmetro. O diâmetro médio geométrico dos agregados (DMG) foi calculado de acordo com a equação 1 de Schaller e Stockinger (1953), e o índice de estabilidade estrutural do solo (IEE), que considera os efeitos combinados da argila, silte e carbono do solo, foi calculado pela equação 2, proposta por Pieri (1992).

$$DMG = 10^{\frac{\sum_{i=1}^N n_i \log D_i}{\sum n_i}} \quad (1)$$

em que, n_i = a porcentagem de agregados retidos em uma determinada peneira; D_i = o diâmetro médio de uma determinada peneira; e N = o número de classes de peneira.

$$IEE = \left(\frac{1,72 \text{ COT}}{A + S} \right) 100 \quad (2)$$

em que, IEE = índice de estabilidade estrutural do solo (%); COT = teor carbono orgânico total (%); A = teor argila (%); e S = teor de silte (%).

A partir dos valores de IEE, Pieri (1992) estabelece quatro regiões, as quais classificam o grau de degradação da estrutura do solo: região (I) indica solo estruturalmente degradado devido a sua intensa perda de matéria orgânica; (II) indica alto risco de degradação estrutural devido à quantidade insuficiente de matéria orgânica; (III) indica baixo risco de degradação estrutural; e (IV) indica quantidade suficiente de matéria orgânica para manter o solo estruturalmente estável.

O carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) foram determinados em alíquotas de $\pm 0,25$ g de solo, pelo método da combustão seca (Nelson e Sommers, 1996). Foi utilizado um analisador elementar com capacidade de determinação macro, modelo CNS982 – LECO. A matéria orgânica do solo (MOS) foi obtida, multiplicando os teores de carbono total por 1,724, fator de conversão de van Bemmelen (Collins e Kuehl, 2001). Para efeitos de comparação entre tratamentos, foi utilizado como referência a proposição de Craul (1999).

O estoque de carbono total foi calculado para a camada de 0,00 – 0,30 m, de acordo com Veldkamp (1994), empregando a seguinte equação:

$$EC = (COT \times Ds \times e) \div 10 \quad (3)$$

em que, EC = estoque de carbono na camada determinada (Mg C ha^{-1}); COT = carbono orgânico total (g kg^{-1}); Ds = densidade do solo (kg dm^{-3}); e = espessura da camada determinada (cm).

Tabela 1. Descrição e caracterização da área experimental e respectivos tratamentos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.

Tipo de solo	Classe textural ⁽¹⁾	Tipo de uso	Área (ha)	Localização	Histórico	Tratamentos
Terra Preta da Amazônia	Franco argilosa	Preservação ambiental	1,2	03°18'18,94" S 60°29'40,22" W	Remanescente de floresta Amazônica, com porte variado de espécies arbóreas nativas, preservada há mais de 100 anos.	VN-TPA
Terra Preta da Amazônia	Argilo arenosa	Quintal agroflorestal	0,8	03°18'19,24" S 60°29'47,21" W	Quintal agroflorestal, caracterizado pelo uso tradicional do solo em uma área habitada por família de ribeirinhos descendentes de indígenas. O sistema apresenta uma diversidade de plantas frutíferas, plantadas aleatoriamente em consórcio com a floresta nativa, presença de pequenos animais, e sem o revolvimento do solo.	QA-TPA
Terra Preta da Amazônia	Franco argilosa	Cultivo convencional	1,2	03°18'17,9" S 60°29'20,6" W	Área cultivada com mamão (<i>Carica papaya</i> L.) variedade Calimosa, espaçamento 3,0 × 2,0 m, em rotação com banana e milho. Adubação orgânica com adubo a base de esterco de galinha (10 Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹). O solo é subsolado anualmente, seguido de enxada rotativa e colheita mecanizada, usando trator Yanmar Agritech 1175S (3.431 kg).	CC-TPA
Terra Preta da Amazônia	Argilo arenosa	Pomar de citros	0,9	03°18'18,98" S 60°29'44,32" W	Área com monocultivo de pomar de laranja, espaçamento de cultivo 4,5 x 4,5 m, com substituição de plantas novas por plantas velhas por meio de dessecação e plantio na mesma cova. O preparo do solo se faz sem adubação, sem revolvimento do solo, e com frequentes capinas entre as linhas de cultivo.	PC-TPA
Terra Mulata	Argilosa	Cultivo convencional	4,3	03°14'30,3" S 60°40'47,46" W	Área cultivada com mamão (<i>Carica papaya</i> L.) variedade Calimosa, espaçamento 3,0 × 1,5 m, em rotação com pimenta malagueta. Adubação orgânica a base de esterco de galinha (15 Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹). O solo é preparado anualmente com grade aradora, usando trator Agrale 5075.4 (3.220 kg).	CC-TM

⁽¹⁾ Dados médios de Argila, Silte e Areia das três profundidades (0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m, 0,20 – 0,30 m). Classe textual de acordo com USDA (2017).

Sabendo-se que as práticas de manejo adotadas nas áreas podem afetar na dinâmica da Ds em profundidade e que esta tem relação direta com os estoques de carbono, correções foram feitas para cada camada de solo, com base na massa equivalente, tomando como referência o tratamento VN-TPA, e seguindo a sugestão de Carvalho et al. (2009). O estoque total de N foi calculado pelo mesmo procedimento.

$$EC_a = COT \times Ds \times (Ds_{ref} \div Ds) \times e] \div 10 \quad (4)$$

em que, EC_a = é o estoque de carbono ajustado por camada ($Mg\ C\ ha^{-1}$); COT = carbono orgânico total na profundidade amostrada ($g\ kg^{-1}$); Ds = densidade do solo na profundidade amostrada ($kg\ dm^{-3}$); Ds_{ref} = densidade do solo na camada amostrada na área de referencial; e = espessura da camada determinada (cm).

2.3 Análise dos dados

A normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias foram testadas pelos testes Shapiro-Wilk e Bartlett ($p < 0,05$), respectivamente, e quando estes não foram atendidos, os dados foram transformados utilizando a função Box-Cox. Na análise univariada, foi utilizado um teste paramétrico (ANOVA) a fim de compreender o efeito dos tratamentos sobre as variáveis dependentes, e quando a hipótese nula foi rejeitada pelo teste F, aplicou-se o teste de Tukey ($p < 0,05$). Além disso, uma análise de correlação de Pearson foi feita para medir as correlações (negativa ou positiva) entre as variáveis contínuas. Todos os procedimentos estatísticos foram desenvolvidos utilizando o software R, versão 4.3.3 (R Core Team, 2023), com auxílio dos pacotes tidyverse (Wickham et al., 2019), MASS (Venables et al., 2002), ExpDes.pt (Ferreira et al., 2021), corrplot (Taiyun and Viliam, 2021) e Hmisc (Harrell, 2019). Os gráficos foram elaborados utilizando o software SigmaPlot 11.0 (SystatSoftware inc., 2007).

3 RESULTADOS

3.1 Alterações nos atributos dependentes da relação massa e volume dos constituintes do solo

A textura nos horizontes antrópicos variou de argilo-arenosa, franco-argilosa a argilosa (Tab. 1), confirmando os resultados constatados por Campos et al. (2011).

De acordo com Lima et al. (2002), os solos com horizontes antropogênicos podem variar de textura arenosa a muito argilosa, devido aos aspectos genéticos destes solos. A diferença textural reflete às variações encontradas nos valores da fração areia, silte e argila ($341,2$ a $516,5$ g kg⁻¹, $95,9$ a $327,5$ g kg⁻¹, $253,8$ a $527,5$ g kg⁻¹, respectivamente; Tab. 2). O conteúdo de areia foi maior nos tratamentos QA-TPA e CC-TPA em todas as camadas, e em PC-TPA nas camadas $0,00 - 0,10$ e $0,10 - 0,20$ m. Para VN-TPA e CC-TM, os maiores conteúdos de areia foram quantificados na camada $0,00 - 0,10$ m. Além disso, todos os tratamentos apresentaram um ligeiro aumento do conteúdo de argila em profundidade.

Em relação aos dados de ADA, as principais diferenças estatísticas foram observadas nos tratamentos QA-TPA na camada $0,00 - 0,10$ m, e CC-TM na camada $0,20 - 0,30$ m (Tab. 2). Por outro lado, na análise do IF, as diferenças estatísticas foram mais evidentes nos menores valores encontrados no tratamento CC-TPA na camada $0,00 - 0,10$ m, e nos maiores valores em CC-TM na camada $0,20 - 0,30$ m (Tab. 2). Apenas na camada $0,10 - 0,20$ m, ambas as variáveis não apresentaram diferenças estatísticas em função do uso e manejo do solo.

Os maiores valores de densidade do solo (D_s) foram observadas no tratamento PC-TPA, com valores médios de $1,40$, $1,43$ e $1,39$ Mg m⁻³ nas camadas $0,00 - 0,10$, $0,10 - 0,20$ e $0,20 - 0,30$ m, respectivamente (Fig. 3). Na camada $0,00 - 0,10$ m, a D_s do tratamento PC-TPA foi significativamente superior aos demais tratamentos, apresentando a seguinte sequência: PC-TPA > CC-TPA > VN-TPA > CC-TM > QA-TPA; $p < 0,01$ (Fig. 3). Já na camada $0,10 - 0,20$ m o mesmo tratamento (PC-TPA) não diferiu de QA-TPA ($1,41$ Mg m⁻³), e ambos foram estatisticamente diferentes ($p < 0,001$) quando comparados aos tratamentos CC-TPA, CC-TM e VN-TPA ($1,34$, $1,31$ e $1,26$ Mg m⁻³, respectivamente). Na camada $0,20 - 0,30$ m a menor média de D_s foi encontrada no tratamento CC-TM ($1,28$ Mg m⁻³; $p < 0,01$), que diferiu estatisticamente quando comparado a PC-TPA, VN-TPA e CC-TPA ($1,39$, $1,36$ e $1,35$ Mg m⁻³, respectivamente; Fig. 3).

3.2 Alterações na estabilidade de agregados estáveis e índices estruturais

3.2.1 Agregados estáveis > 2 mm

Na camada $0,00 - 0,10$ m (Fig. 2), as maiores médias e respectivos erros (padrão) de porcentagem de agregados estáveis da classe > 2 mm foram observados em

QA-TPA ($37,20 \pm 6,1\%$), seguido de PC-TPA ($36,65 \pm 4,7\%$), CC-TPA ($26,18 \pm 5,0\%$) e VN-TPA ($24,71 \pm 5,3\%$). Por outro lado, o tratamento CC-TM ($3,69 \pm 0,39\%$) sobre terra mulata, apresentou a menor média e redução significativa em relação aos demais tratamentos (Fig. 2).

Tabela 2. Teores médios da distribuição granulométrica (g kg^{-1}), ADA (%) e IF (%) dos solos antropogênicos, em Manacapuru, Amazonas, Brasil.

Tratamentos	Atributos físicos do solo				
	Argila	Silte	Areia	ADA	IF
<u>Camada 0,00 – 0,10 m</u>					
VN-TPA	346,2	209,0	444,8	11,88 a	66,20 ab
	(1,09)	(0,86)	(0,26)	(2,73)	(7,02)
QA-TPA	317,5	179,2	503,3	5,25 b	83,60 a
	(0,97)	(0,95)	(1,10)	(0,88)	(2,48)
CC-TPA	253,8	327,5	418,8	13,00 a	48,73 b
	(1,16)	(0,96)	(0,22)	(0,54)	(0,66)
PC-TPA	301,2	182,3	516,5	10,38 ab	65,42 ab
	(1,10)	(1,10)	(0,24)	(1,42)	(4,83)
CC-TM	287,5	262,5	450,0	7,00 ab	75,47 a
	(0,97)	(0,97)	(0,72)	(0,08)	(3,20)
<u>Camada 0,10 – 0,20 m</u>					
VN-TPA	421,3	223,9	354,9	19,63 a	53,79 a
	(0,94)	(1,03)	(0,26)	(3,99)	(8,50)
QA-TPA	377,5	164,5	458,0	13,25 a	64,93 a
	(0,32)	(0,20)	(0,15)	(1,03)	(2,57)
CC-TPA	288,8	326,6	384,7	12,13 a	57,78 a
	(0,99)	(0,79)	(0,23)	(1,70)	(6,55)
PC-TPA	440,0	101,9	458,1	14,75 a	66,49 a
	(0,55)	(0,55)	(0,43)	(1,79)	(4,04)
CC-TM	453,8	156,8	389,4	10,38 a	77,13 a
	(0,50)	(0,99)	(0,19)	(0,08)	(5,62)
<u>Camada 0,20 – 0,30 m</u>					
VN-TPA	427,5	204,4	368,1	14,87 a	65,52 b
	(1,03)	(0,92)	(0,13)	(2,67)	(5,35)
QA-TPA	420,0	139,5	440,5	18,00 a	57,35 b
	(0,46)	(0,44)	(0,12)	(3,31)	(7,40)
CC-TPA	322,5	297,1	380,4	14,62 ab	54,09 b
	(1,13)	(1,22)	(0,27)	(1,26)	(5,59)
PC-TPA	492,5	95,9	411,6	15,62 a	68,24 ab
	(0,15)	(0,15)	(0,27)	(2,15)	(4,49)
CC-TM	527,5	131,3	341,2	5,00 b	90,50 a
	(0,64)	(1,27)	(0,08)	(0,35)	(0,77)

Números entre parênteses “()” expressam o erro padrão da média. ADA = Argila dispersa em água, IF = índice de floculação, VN-TPA = Remanescente de floresta nativa em TPA, QA-TPA = Quintal

agroflorestal em TPA, CC-TPA = Plantio de mamão em TPA, PC-TPA = Pomar de citros em TPA, CC-TM = Plantio de mamão em TM. Letras iguais indicam que não houve diferença estatística, e letras diferentes indicam que pelo menos dois tratamentos diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ($p < 0,05$). $n = 5$.

Na camada 0,10 – 0,20 m, o tratamento CC-TPA ($36,46 \pm 5,6\%$) apresentou maior percentagem de agregados estáveis, diferindo estatisticamente de todos os tratamentos. Por outro lado, o tratamento CC-TM ($4,45 \pm 3,2\%$; $p < 0,001$), a exemplo do observado na camada 0,00 – 0,10 m, apresentou menor estabilidade, diferindo de CC-TPA e VN-TPA ($18,63 \pm 3,2\%$). Não foram encontradas diferenças entre os tratamentos QA-TPA ($7,31 \pm 2,29\%$) e PC-TPA ($6,32 \pm 1,18\%$). Apesar das ligeiras variações entre os tratamentos VN-TPA, QA-TPA, PC-TPA e CC-TM ($10,91 \pm 2,85\%$, $7,17 \pm 2,9\%$, $5,86 \pm 1,31\%$ e $3,51 \pm 1,16\%$, respectivamente), apenas o tratamento CC-TPA ($23,59 \pm 2,13\%$; $p < 0,001$) foi considerado estatisticamente maior que todos os outros tratamentos na camada 0,20 – 0,30 m do solo (Fig. 2).

3.2.2 Agregados estáveis 2 – 1 mm

As maiores proporções de agregados estáveis na classe 2 – 1 mm de diâmetro, foram quantificadas no tratamento VN-TPA, em todas as camadas avaliadas. Essa resiliência pode estar relacionada a ação dos fatores intrínsecos desse ambiente não antropizado, na formação desses agregados. Assim, na camada 0,00 – 0,10 m, quando se comparou os tratamentos VN-TPA ($53,21 \pm 3,2\%$), QA-TPA ($46,22 \pm 4,72\%$), CC-TPA ($44,16 \pm 3,93\%$) e PC-TPA ($39,83 \pm 3,58\%$), não foram observadas diferenças. Uma redução significativa foi verificada no tratamento CC-TM ($27,69 \pm 2,17\%$; $p < 0,001$), que apresentou média bem abaixo dos demais tratamentos, exceto quando comparado ao tratamento PC-TPA ($39,83 \pm 3,58$) (Fig. 2). Os valores em VN-TPA ($57,68\% \pm 2,25$; $p < 0,001$) estão acima dos outros tratamentos, na camada 0,10 – 0,20 m, e uma perda de aproximadamente 41% dessa estabilidade foi verificada no solo submetido às práticas de uso e manejo em PC-TPA ($34,25 \pm 0,53\%$). Na camada 0,20 – 0,30 m, constatou-se que as práticas de uso e manejo nos tratamentos QA-TPA ($45,49 \pm 2,04\%$), CC-TPA ($38,90 \pm 1,36\%$), PC-TPA ($36,24 \pm 1,05\%$), e CC-TM ($30,13 \pm 1,70\%$) reduziram significativamente em 17,89%, 29,86%, 34,66% e 45,67%, quando comparadas ao tratamento VN-TPA ($55,46 \pm 1,76\%$; $p < 0,001$).

3.2.3 Agregados estáveis < 1 mm

Na camada 0,00 – 0,10 m, o tratamento CC-TM foi significativamente maior que os outros tratamentos, e a média de agregados < 1 mm neste tratamento ($62,21 \pm 1,92\%$; $p < 0,001$) foi pelo menos 2,3, 3, 3,1 e 4,1 vezes maior que as quantificadas em CC-TPA, PC-TPA, VN-TPA e QA-TPA ($26,95 \pm 1,09\%$, $20,72 \pm 1,47\%$, $19,95 \pm 2,5\%$ e $15,03 \pm 1,49\%$, respectivamente, Fig. 2). A quantidade de agregados estáveis nessa mesma classe diminuiu de PC-TPA > CC-TM > QA-TPA > VN-TPA > CC-TPA; $p < 0,001$, na camada 0,10 – 0,20 m (Fig. 2). Já na camada 0,20 – 0,30 m os maiores valores foram encontrados em CC-TM e PC-TPA ($60,4 \pm 1,64\%$, $53,91 \pm 1,7\%$, respectivamente). Esses valores mostraram-se muito acima, e, portanto, diferiram dos encontrados em VN-TPA e CC-TPA ($30,8 \pm 0,94\%$, $34,68 \pm 1,17\%$; $p < 0,001$, Fig. 2).

A maior estabilidade de agregados estáveis, portanto foi observada na classe de 2 – 1 mm de diâmetro, para os tratamentos VN-TPA, QA-TPA, CC-TPA e PC-TPA, em todas as camadas avaliadas (Fig. 2). Segundo Campos et al., (2012), essa é uma característica comum em solos de origem antrópica, uma vez que a predominância na formação de microagregados é relacionado a grande quantidade de matéria orgânica derivada da queima parcial do carvão vegetal. Por outro lado, no tratamento CC-TM, a maior estabilidade de agregados estáveis foi observada na classe < 1 mm de diâmetro sendo uma provável explicação o recém preparo do solo, ocorrida 14 dias antes da coleta do solo (Fig. 2).

A estimativa da classe de agregados de maior ocorrência (DMG), na camada 0,00 – 0,10, foram encontrados nos tratamentos sem revolvimento do solo (Fig. 3). O maior índice foi observado no tratamento QA-TPA ($2,7 \pm 0,21\%$), seguido de VN-TPA ($2,08 \pm 0,24\%$) e PC-TPA ($2,16 \pm 0,17\%$). O DMG diminuiu significativamente no solo sob os tratamentos CC-TPA ($1,75 \pm 0,15\%$) e CC-TM ($0,55 \pm 0,04\%$), sendo este último, portanto considerado de baixa estabilidade com consequências negativas sobre a permeabilidade e formação de crostas na superfície. Enquanto os demais tratamentos, com índices acima de 0,5 mm mostram-se mais resistentes ao esboroamento (desagregação) e à dispersão (Azevedo; Bonumá, 2004).

Embora os resultados de DMG em CC-TPA ($2,26 \pm 0,2\%$) e VN-TPA ($1,86 \pm 0,1\%$) não tenham apresentado diferenças significativas, ambos foram estatisticamente maiores ($p < 0,001$) que os outros tratamentos na camada 0,10 – 0,20 m (Fig.

2). Para este índice de agregação, a seguinte sequência de estabilidade foi constatada: CC-TPA > VN-TPA > QA-TPA > CC-TM > PC-TPA. Reduções na estabilidade foram observadas em PC-TPA ($0,74 \pm 0,02\%$) e CC-TM ($0,88 \pm 0,04\%$), quando comparados ao tratamento VN-TPA, foram de 2,5 e 2,1 vezes.

Na camada de 0,20 – 0,30 m, a maior estabilidade de agregados também foi observada em CC-TPA ($1,45 \pm 0,07\%$) e VN-TPA ($1,37 \pm 0,09\%$), e da mesma forma reduziu significativamente nos tratamentos PC-TPA e CC-TM ($0,77 \pm 0,04\%$, $0,66 \pm 0,03\%$; $p < 0,001$). Essa diminuição pode ser atribuída à baixa produção de biomassa radicular entre as linhas de plantio, em decorrência das capinas constantes, e, do revolvimento do solo ao longo de 20 anos.

O impacto dos tratamentos sobre o índice de estabilidade estrutural do solo (IEE), atributo dinâmico que considera o efeito combinado da textura (silte mais argila) e, conteúdo de carbono do solo (Fig. 3), foi observado a partir do tratamento referência (VN-TPA), que apresentou médias predominantemente maiores em todas as camadas prospectadas, exceto na camada 0,00 – 0,10 m, em que o tratamento QA-TPA foi superior a todos os tratamentos. Os resultados obtidos evidenciam que a menor estabilidade estrutural (IEE) foi observada, em todas as camadas do tratamento PC-TPA (Fig. 3). Por outro lado, VN-TPA ($8,67 \pm 0,12\%$) e QA-TPA ($10,53 \pm 0,34\%$), na camada 0,00 – 0,10 m, promoveram valores elevados de IEE, indicando uma melhoria de 21% na estrutura do solo manejado no sistema de quintais florestais em comparação a área de floresta.

Com base no IEE, os resultados sugerem a seguinte sequência de impacto promovidos pelos diferentes tipos de uso e manejo nos solos antropogênicos deste estudo: camada de 0,00 – 0,10 m (QA-TPA > CC-TM > VN-TPA > CC-TPA > PC-TPA, $p < 0,001$); camada de 0,10 – 0,20 (VN-TPA > CC-TPA > CC-TM > QA-TPA > PC-TPA, $p < 0,001$) e camada 0,20 – 0,30 m (VN-TPA > CC-TPA > QA-TPA > CC-TM > PC-TPA, $p < 0,001$).

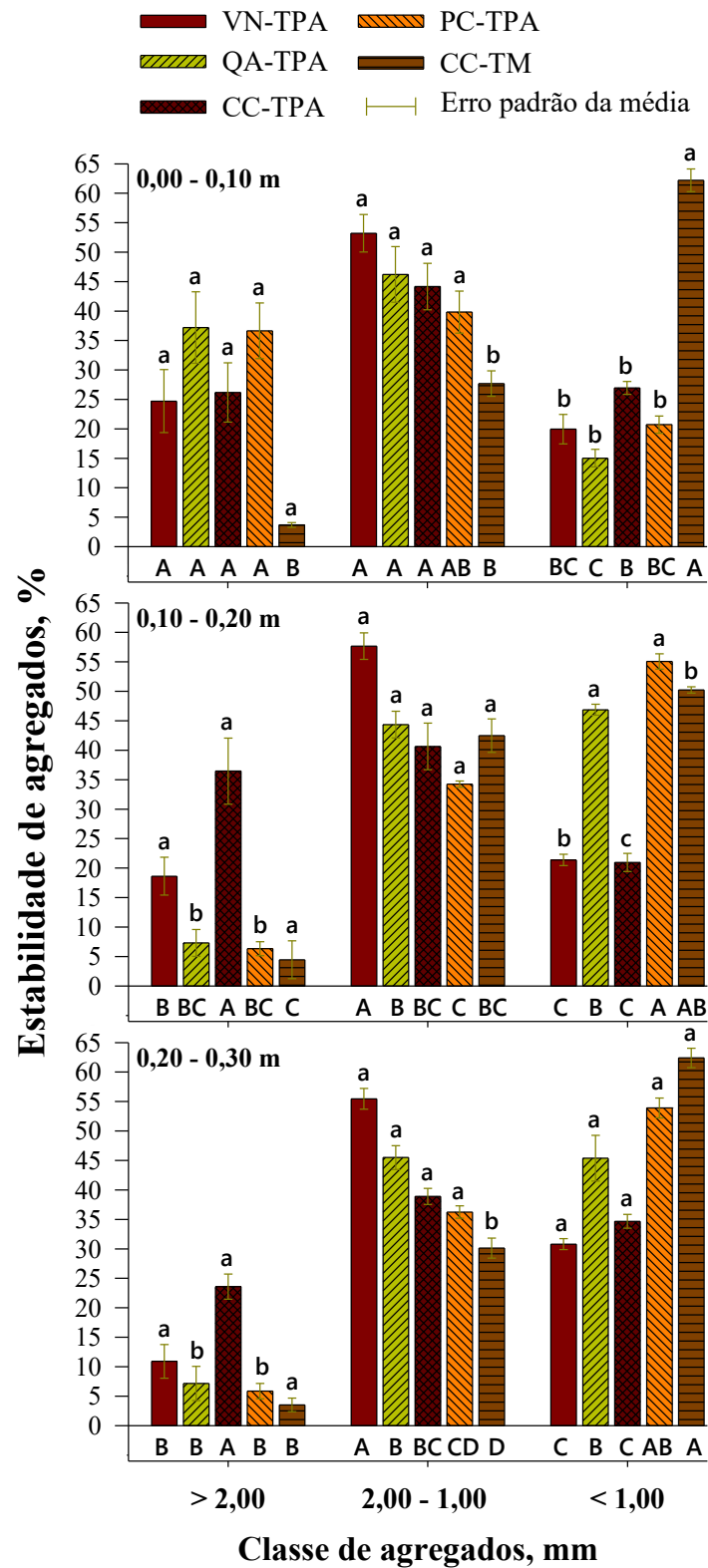


Figura 2. Estabilidade de agregados no horizonte antropogênico em função de diferentes usos e manejos, distribuídos por camada. Letras maiúsculas destacam a comparação entre os tratamentos, e letras minúsculas representam a comparação entre as camadas no mesmo tratamento pelo teste Tukey ($p < 0,05$). $n = 5$.

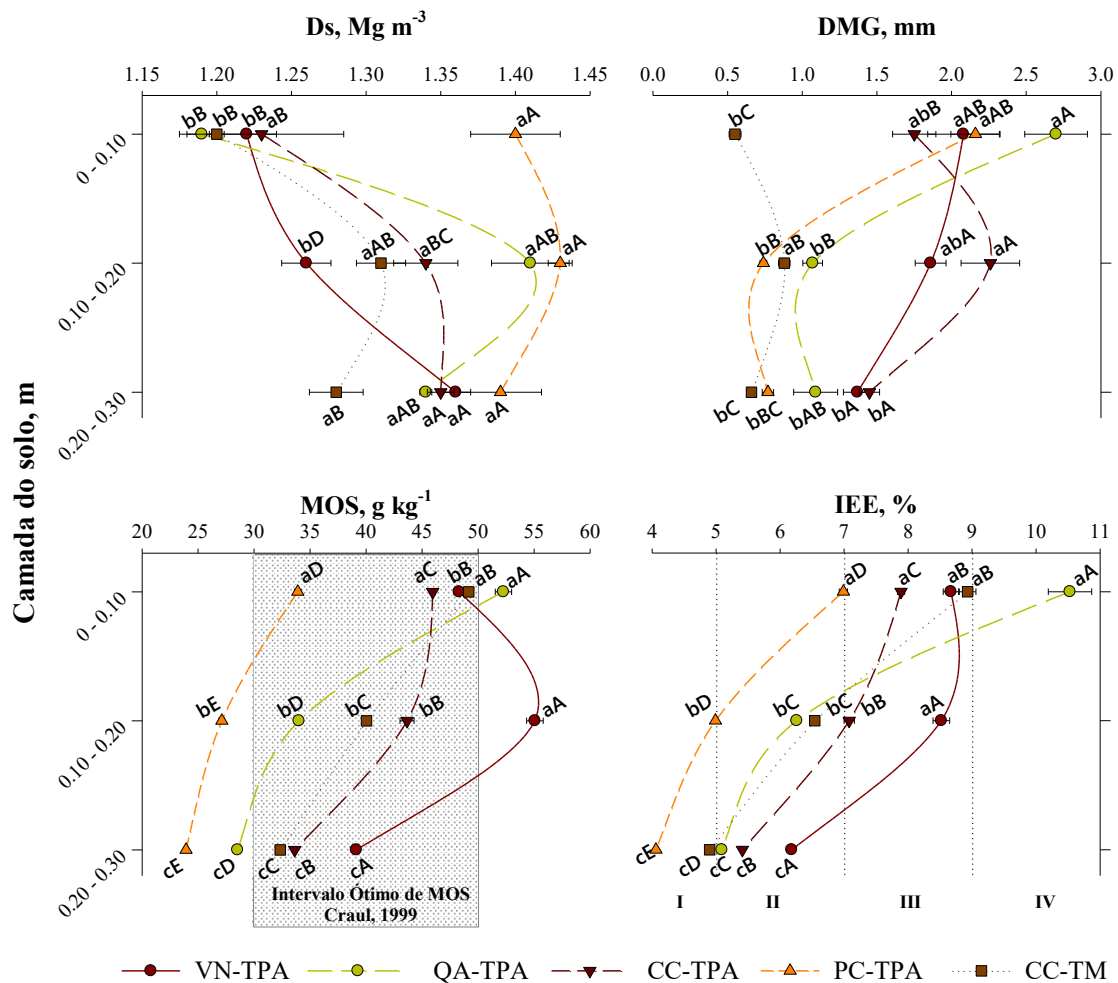


Figura 3. Indicadores da qualidade estrutural do solo no horizonte antropogênico em função da profundidade e diferentes tipos de uso e práticas agrícolas. Ds = densidade do solo; DMG = diâmetro médio geométrico; MOS = matéria orgânica do solo; IEE = índice de estabilidade estrutural. Letras maiúsculas indicam comparações entre tratamentos e minúsculas entre camadas no mesmo tratamento, ambos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). $n = 5$.

De acordo com a classificação sugerida por Pieri (1992), na camada 0,00 – 0,10 m, os tratamentos se enquadraram a partir da zona III (indica baixo risco de degradação estrutural), com destaque para QA-TPA que se enquadrou na zona IV, indicando que os quintais florestais subsidiam quantidades suficientes de MO para manter o solo estruturalmente estável. Ao analisar a camada 0,10 – 0,20 m, apenas para o tratamento PC-TPA o IEE ficou na região I (indica solo estruturalmente degradado devido a sua intensa perda de matéria orgânica), enquanto CC-TM e QA-TPA foram enquadrados na região II (indica alto risco de degradação estrutural devido à quantidade insuficiente de matéria orgânica). Nesta camada, os IEE estimados para VN-

TPA e CC-TPA ajustaram-se na região III, indicando baixo risco de degradação estrutural destes tratamentos. Por fim, na camada 0,20 – 0,30 m, as médias do IEE nos tratamentos CC-TM e PC-TPA foram classificados na região I, enquanto os demais tratamentos na região II (Fig. 3).

3.3 Teores totais e estoques de carbono e nitrogênio nos horizontes antropogênicos

Os maiores teores de carbono orgânico total do solo (COT) foram quantificados na camada 0,00 – 0,10 m (3,03%) de QA-TPA e nas camadas 0,10 – 0,20 m (3,19%) e 0,20 – 0,30 m (2,27%) do tratamento VN-TPA (Fig. 4). Os menores valores de COT foram observados em todas as camadas do tratamento PC-TPA, sendo esse agrossistema o que mais restringiu acúmulo de carbono no solo (Fig. 4).

O COT foi reduzido significativamente à medida que se aumentou a profundidade do solo, exceto para VN-TPA, no qual houve um aumento significativo da camada 0,00 – 0,10 m para 0,10 – 0,20 m. Nesse caso, 66,1% de todo COT quantificado, concentrou-se nessas camadas (0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m), isto é, $2,80 \pm 0,03\%$ e $3,19 \pm 0,05\%$, respectivamente. Na comparação com VN-TPA, todo o COT medido no perfil de 0,00 – 0,30 m em CC-TPA, CC-TM, QA-TPA e PC-TPA apresentou reduções de 14%, 15%, 20% e 40%. Esses resultados evidenciam que a preservação da vegetação nativa e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis têm contribuído para a estabilidade e ou conservação do COT em solos antropogênicos ao longo do tempo.

O conteúdo de nitrogênio total do solo (NT) foi maior no tratamento CC-TPA, em todas as camadas, exceto quando comparado com VN-TPA, na camada 0,20 – 0,30 m (Fig. 4). A resposta de NT a todos os tratamentos, seguiu um comportamento similar ao observado para os valores de COT no que se refere a sua distribuição em profundidade, excetuando-se o tratamento de referência (VN-TPA). A diferença de NT entre as camadas foi significativa apenas na camada 0,20 – 0,30 m do tratamento de referência. Os menores conteúdos de NT foram observados em todas as camadas do tratamento PC-TPA (Fig. 4), enquanto CC-TPA apresentou incrementos significativos da ordem de 12,24%, 22,45%, 30,61% e 42,85%, quando da comparação com VN-TPA, CC-TM, QA-TPA e PC-TPA, respectivamente.

O maior estoque de carbono determinado em todo o perfil de solo avaliado (0,00–0,30 m) foi observado no tratamento de referência (VN-TPA), com 140 Mg C

ha⁻¹. Por outro lado, o menor valor foi registrado no tratamento PC-TPA (83 Mg C ha⁻¹), representando uma redução de 40,5% do carbono estocado no horizonte antropogênico, em decorrência da respectiva prática agrícola.

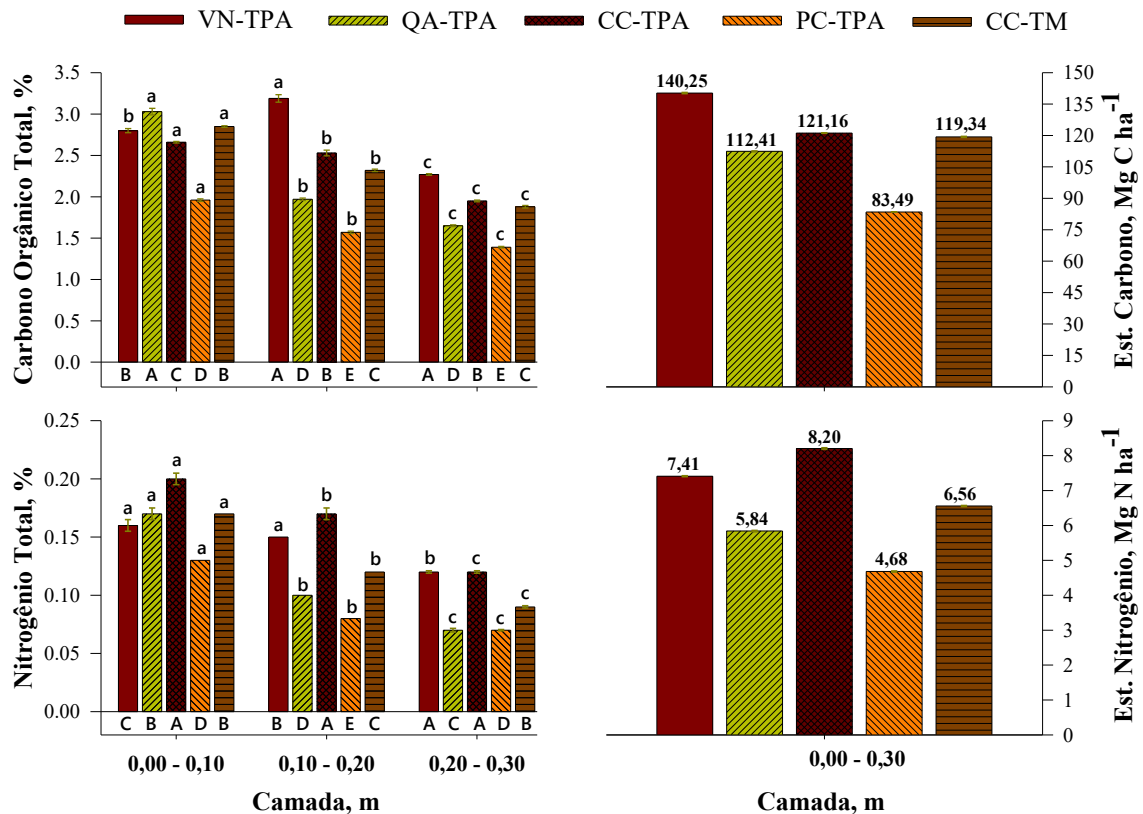


Figura 4. Conteúdos e estoques de carbono e nitrogênio em três camadas do horizonte antropogênico, em diferentes tipos de uso e manejo praticados por comunidades rurais na Amazônia brasileira. Letras maiúsculas indicam comparações entre tratamentos e minúsculas entre camadas no mesmo tratamento, ambos pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). $n = 5$.

O estoque de nitrogênio foi maior no tratamento CC-TPA, independentemente das práticas de manejo e tempo de uso (Fig. 4). O solo nesse tratamento estocou cerca de 29% e 10% de nitrogênio a mais quando comparado aos tratamentos QA-TPA (5,84 Mg N ha⁻¹) e VN-TPA (7,41 Mg N ha⁻¹), respectivamente (Fig. 4). A diferença mais expressiva foi observada entre o tratamento CC-TPA (8,20 Mg N ha⁻¹) e PC-TPA (4,68 Mg N ha⁻¹), que representou uma redução de 42,9% de nitrogênio estocado.

Tabela 3. Matriz de correlação de Pearson entre os atributos físico-estruturais e químicos dos solos antropogênicos da Amazônia Central.

Atributos	Argila	Areia	Silte	ADA	IF	Ds	DMG	IEE	> 2	2 – 1	< 1	COT	NT
Argila	1,00												
Areia	-0,46**	1,00											
Silte	-0,79**	-0,18	1,00										
ADA	0,16	-0,19	-0,05	1,00									
IF	0,30	0,07	-0,38	-0,86**	1,00								
Ds	0,27	0,04	-0,32	0,26	-0,13	1,00							
DMG	-0,55**	0,27	0,42**	-0,08	-0,16	-0,27	1,00						
IEE	-0,63**	0,35	0,45**	-0,28	0,06	-0,69**	0,60**	1,00					
> 2	-0,62**	0,29	0,48**	-0,12	-0,18	-0,21	0,94**	0,48**	1,00				
2 – 1	-0,05	-0,10	0,12	0,30	-0,26	-0,07	0,36	0,30	0,06	1,00			
< 1	0,54**	-0,18	-0,47**	-0,06	0,29	0,22	-0,94**	-0,57**	-0,84**	-0,59**	1,00		
COT	-0,50**	-0,01	0,56**	-0,18	-0,01	-0,73**	0,53**	0,93**	0,40*	0,39*	-0,55**	1,00	
NT	-0,76**	0,10	0,77**	-0,24	-0,12	-0,64**	0,60**	0,86**	0,57*	0,21	-0,60**	0,89**	1,00

Nível de significância: * $p < 0,05$, ** $p < 0,01$. ADA = argila dispersa em água; IF = índice de floculação; Ds = densidade do solo; DMG = diâmetro médio geométrico; IEE = índice de estabilidade estrutural; COT = carbono orgânico total; NT = nitrogênio total. Coeficientes de correlação superiores a 0,5 estão sublinhados.

Embora esteja claro a ocorrência do impacto da mudança de uso da terra de vegetação nativa para os demais usos, não se constatou afeitos significativos quando a comparação se deu entre os tratamentos cuja práticas de manejo demandam a movimentação do solo (CC-TPA e CC-TM) em relação àqueles sem revolvimento do solo (QA-TPA e PC-TPA). Observou-se estoques da ordem de 121 Mg C ha⁻¹ (CC-TPA), 119 Mg C ha⁻¹ (CC-TM), 112 Mg C ha⁻¹ (QA-TPA) e 83 Mg C ha⁻¹ (PC-TPA). Desse modo, a pesquisa sugere, tomando como referência a floresta nativa (VN-TPA), a seguinte ordem de impacto sobre os estoques de carbono nos horizontes antropizados deste estudo: VN-TPA > CC-TPA > CC-TM > QA-TPA > PC-TPA, enquanto para os estoques de nitrogênio: CC-TPA > VN-TPA > CC-TM > QA-TPA > PC-TPA. Esse mesmo padrão foi observado para os teores de COT e NT.

4 DISCUSSÃO

4.1 Efeitos das práticas agrícolas e do uso da terra na saúde física dos solos antropogênicos

Os maiores conteúdos de areia encontrados nos solos deste estudo até a camada 0,30 m, corroboram com os observados por Campos et al. (2011), quando caracterizaram as terras pretas arqueológicas na região do médio Rio Madeira. Para Soares et al. (2021), essa predominância da fração areia nos primeiros centímetros do solo, é uma particularidade dos solos antropogênicos da Amazônia brasileira. A hipótese mais aceita aponta que os maiores conteúdos de areia nesses solos são devido ao uso do fogo, provocado por indígenas pré-colombianos. Dessa maneira, a caulinita se decompõe quando aquecida, e esse material de argila degradado e combinado à disponibilidade de material orgânico abundante, originam partículas organominerais do tamanho da fração areia (Teixeira e Martins, 2003; Teixeira et al., 2009). Para Lima et al. (2002) essa característica (maior conteúdo de areia) também se deve à gênese desses solos, sobretudo às atividades que promoveram remoção das frações mais finas, uma vez que os povos pré-colombianos traziam sedimentos ricos em areia das margens das margens dos rios, utilizados para confeccionar seus utensílios cerâmicos. Em concordância com Soares et al. (2021), as ligeiras variações na classe textural em solos antropogênicos até a camada de 0,30 m, como as observadas nesta

pesquisa (Tab. 2), podem ser atribuídas às práticas de manejo do solo, como o revolvimento da terra para o uso e manejo com espécies cultivadas.

Os altos valores do índice de floculação (IF) para todos os tratamentos até a camada 0,30 m, foram semelhantes aos encontrados por Campos et al. (2011); Bastião et al. (2020), quando investigaram o IF em diferentes solos antropogênicos na região amazônica. No entanto, essa variação que alcançou de 48,53% a 90,50% (Tab. 2), bem como a correlação significativa do atributo IF apenas com ADA ($r = -0,86$; $p < 0,01$; Tab. 3), corroborou com os resultados reportados por Souza et al. (2004), que ao analisar o comportamento físico de um Latossolo Amarelo muito argiloso da Amazônia Central, encontraram valores de IF próximos a 90% até a camada 0,40 m.

Os maiores valores de IF foram quantificados nos tratamentos QA-TPA e CC-TM, nas camadas 0,00 – 0,10 e 0,20 – 0,30 m, respectivamente (Tab. 2). E apesar das diferenças estatísticas apresentadas, esse aumento entre os tratamentos pode ser justificado pelo maior acúmulo de carbono (Fig. 4) e argila (Tab. 2). Os altos valores de IF também podem ter sido influenciados pelos maiores teores da fração argila, uma vez que a dispersão e floculação da argila depende de vários fatores, por exemplo: tipo de argila, textura do solo, bases trocáveis e carbono orgânico do solo (Abbaslou et al., 2020). A ação da matéria orgânica sobre as argilas também pode ter atuado como agente floculante ou dispersante, como sugeriu Lee et al. (2012), o que vai depender da natureza e estado das partículas do solo, conforme aponta Melo et al. (2022).

As maiores modificações na Ds foram constatadas no tratamento PC-TPA, quando comparado com VN-TPA (Fig. 3). Esse aumento foi de 15% e 14%, respectivamente, nas camadas 0,00 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m, podendo ser atribuído às capinas constantes, que comprometeram o crescimento e formação de biomassa radicular por mais de 4 décadas. Desse modo, a exposição do solo à ação das intensas chuvas e calor da região amazônica, causou depleção do conteúdo de carbono, aumentando a Ds.

O efeito do carbono do solo na Ds é evidenciado pela significativa correlação entre esses atributos ($r = -0,73$; $p < 0,01$; Tab. 3). Resultados semelhantes foram reportados por Bieluczyk et al. (2023), além de diversos estudos, os quais comprovaram que o uso e práticas agrícolas inadequadas do solo expõe a MOS à acelerada decomposição e perdas (Segnini et al., 2013; Tenelli et al., 2019). Maiores Ds indicam

possíveis camadas compactadas, e isso pode ser um indício de maior resistência mecânica do solo à penetração das raízes. Apesar dos aumentos significativos, todos os valores de D_s deste estudo, mostraram-se abaixo dos limites críticos de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ (Reynolds et al., 2002) e $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ (Araujo et al., 2004), considerados para solos com maiores teores da fração areia (Fig. 3).

Ao analisar o efeito das práticas de uso e manejo do solo na estabilidade de agregados $> 2 \text{ mm}$, observou-se que, com base no tratamento VN-TPA, as reduções significativas na camada $0,00 - 0,10$ e $0,10 - 0,20 \text{ m}$ foram atribuídas ao revolvimento do solo em CC-TM (Fig. 2). Além disso, os resultados indicam que o uso de mecanização no preparo do solo (subsolagem), bem como na colheita de mamão, foi o principal fator no aumento da percentagem de agregados estáveis em CC-TPA, nas camadas $0,10 - 0,20$ e $0,20 - 0,30 \text{ m}$. Estes resultados estão em concordância com Silva et al. (2020), quando afirmaram que altos valores de agregados $> 2 \text{ mm}$ em áreas agrícolas, pode ser resultado da mecanização agrícola. A formação e o tamanho de macroagregados são influenciados pelo uso e manejo do solo, portanto, maiores agregados também podem ter origem da compactação do solo (Soares et al., 2018), configurando agregados de baixa qualidade (Luciano et al., 2010). De acordo com Xu et al. (2020), agregados $> 2 \text{ mm}$ são positivamente correlacionados com atributos físico-químicos e biológicos do solo. Neste mesmo entendimento, Lima et al. (2024) depois de pesquisas aplicadas na Amazônia, sugere que as diferenças observadas na proporção de agregados estáveis, após a conversão de florestas para agrossistemas, indicam mudanças nas propriedades do solo.

O menor conteúdo de carbono observado nos tratamentos dependentes de práticas mecânicas no solo, pode ter sido o principal fator nas alterações observadas em CC-TM e CC-TPA (Fig. 4). Em ambientes florestais ou agroflorestais, a funcionalidade do sistema radicular é um dos mais importantes fatores na formação de agregados estáveis no solo (Pinto et al., 2023). Os resíduos orgânicos produzidos abaixo do solo, aumentam o conteúdo de carbono, que consequentemente atua como agente cimentante na formação de agregados (Almeida et al., 2024). Como as práticas agrícolas em solos cultivados afetam diretamente na redução da quantidade de macroagregados (Bouajila et al., 2021), há também, reduções do carbono do solo anteriormente protegidos por esses agregados.

Os resultados do índice de agregação (DMG) reiteram a resposta dos tratamentos à percentagem de agregados estáveis > 2 mm. Ambos os atributos se correlacionaram positivamente ($r = 0,94$; $p < 0,01$; Tab. 3). A redução dos valores de DMG no tratamento CC-TM nas três camadas, e o aumento em CC-TPA nas camadas 0,10 – 0,20 e 0,2 – 0,30 m (Fig. 3), também pode ser explicado pelo efeito da mecanização nas diferentes etapas do manejo. Esses resultados estão de acordo com aqueles encontrados Souza et al. (2014). Entretanto, a redução de DMG em PC-TPA, nas camadas 0,10 – 0,20 e 0,2 – 0,30 m, estão mais relacionadas aos baixos teores de carbono no solo, uma vez que no histórico de manejo deste tratamento não há relatos de revolvimento do solo. Pesquisas sobre solos amazônicos, com outros objetivos, já evidenciaram a relação direta da estabilidade de agregados destes solos com o conteúdo de carbono (Souza et al., 2020).

A redução observada na percentagem de agregados estáveis, da classe 2 – 1 mm de diâmetro dos demais tratamentos em relação ao tratamento de referência VN-TPA, nas três profundidades, é consequência das práticas antrópicas. Este resultado corrobora com aqueles encontrados por Lima et al. (2024), os quais, ao analisarem a estabilidade de agregados em diferentes sistemas de uso na Amazônia, concluíram que as florestas nativas e as agroflorestas apresentam maior estabilidade de agregados desta classe quando comparado a outros agrossistemas, ficando claro que a maior estabilidade em ambientes de floresta se deve, principalmente, aos maiores teores de carbono orgânico.

Em pesquisas sobre solos antropogênicos da Amazônia, Campos et al. (2012), Soares et al. (2018); Souza et al. (2020), também destacaram o efeito dos maiores conteúdos de carbono orgânico do solo na estabilização de agregados da classe 2 – 1 mm. A maior percentagem de agregados estáveis da classe de agregados < 1 mm, encontrada em todas as camadas do tratamento CC-TM, e nas camadas mais subsuperficiais em PC-TPA, está relacionado à desagregação dos macroagregados e consequente aumento de agregados de menor tamanho. Esses resultados confirmam aqueles reportados por Lima et al. (2024), quando comprovaram que a conversão da floresta Amazônica para cultivos agrícolas causa redução dos agregados > 2 mm, e favorece o aumento de agregados com 2 – 1 mm, e < 1 mm de diâmetro.

De modo geral, os agregados da classe 2 – 1 mm não variaram em profundidade, exceto no tratamento CC-TM (Fig. 2). Os expressivos efeitos sobre a

percentagem de agregados estáveis observados no tratamento CC-TM, foram atribuídos ao preparo do solo que ocorreu 14 dias antes da coleta das amostras. É sabido que as práticas mecânicas, como revolvimento das camadas por implementos agrícolas, alteram as condições dos atributos físicos, principalmente aqueles relacionados à agregação (Vieira e Muzilli, 1995).

Os resultados revelam, com exceção de CC-TPA e CC-TM, que a percentagem de agregados > 2 mm apresentou tendência de redução em profundidade, enquanto as percentagens dos agregados da classe < 1 mm aumentaram em profundidade para todos os tratamentos. Resultados semelhantes foram reportados por Frozzi et al. (2020), quando analisaram os atributos físicos dos solos na região sul do Amazonas.

4.2 Efeitos das práticas agrícolas e do uso do solo na saúde química dos solos antropogênicos

As práticas de uso e manejo promovidas por agricultores e ribeirinhos da Amazônia provocaram significativas perdas dos teores de COT e NT nos solos antropogênicos. Observa-se perdas significativas provocadas pelos tratamentos antropizados que demandaram práticas convencionais, quando comparados ao tratamento de referência (VN-TPA) e ao tratamento definido pelo sistema de quintal agroflorestal (QA-TPA), especialmente na camada 0,00 – 0,10 m (Fig. 4). Frozzi et al. (2020) também constataram impacto positivo de uma agrofloresta sobre ganhos de COT nas camadas superficiais de solos da Amazônia. As práticas convencionais de preparo do solo, como visto em CC-TPA e CC-TM, bem como a drástica alteração da vegetação no manejo em PC-TPA, foram os principais fatores dessas perdas.

Para Lima et al. (2021) a sensibilidade dos atributos do solo quanto aos impactos dessas práticas e usos, pode ser simplificada pela quantificação das perdas ou acúmulo de COT. O papel carbono do solo como indicador de qualidade na nossa pesquisa, deve-se à constatação da sua ação tanto na formação de agregados mais estáveis, quanto na verificação da capacidade desses pedoambientes em estocar carbono. Destaca-se, também, a relação direta entre os atributos físico-químicos investigados, analisada a partir dos resultados das correlações positivas entre COT e agregados > 2 mm ($r = 0,40$; $p < 0,05$), COT e DMG ($r = 0,53$; $p < 0,01$) e COT e IEE ($r = 0,93$; $p < 0,01$) (Tab. 3).

Os resultados reiteram que ambientes florestais atuam na manutenção do COT, principalmente devido à estruturação do solo, como reportado por Souza et al. (2020) e Oliveira et al. (2013). Estes autores relatam que a qualidade e quantidade dessa agregação são influenciadas pelas raízes, seja pela liberação de exsudatos orgânicos, que servem de energia para a atividade microbiana e, ou, por sua ação na aproximação das partículas minerais, em função das pressões exercidas durante seu crescimento, favorecendo a coesão entre as partículas do solo (Souza et al., 2020).

Esta pesquisa, portanto, destaca o problema da conversão de florestas para sistemas agrícolas em sítios antropogênicos da Amazônia Central, caso práticas agrícolas sustentáveis para os Antrossolos dessa região não sejam adotadas. Pesquisas para outros tipos de solos (minerais), em várias regiões do mundo, já apontam o impacto da ausência das boas práticas agrícolas nas perdas no COT do solo (Silva et al., 2010; Sá et al., 2010; Iamaguti et al., 2015; Frozzi et al., 2020; Zhao et al., 2023).

Os tratamentos antropizados também alteraram o conteúdo de NT dos solos antropogênicos. Apesar disso, quando comparados com VN-TPA, as reduções foram mais evidentes nas camadas 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,30 m (Fig. 4). Estes resultados reforçam a contribuição de raízes e serapilheira na camada mais superficial do solo (0,00 – 0,10 m), que normalmente é mais intensa e impacta na disponibilidade de nutrientes do solo (Souza et al., 2020). Os maiores teores de NT encontrados em CC-TPA e CC-TM, são relacionados ao uso de adubação orgânica a base de esterco de aves ($10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $15 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente), comprovadamente rico em nitrogênio, com potencial para melhorar a qualidade do solo (Yeasmin et al., 2024).

Para Lehmann et al. (2003), as baixas quantidades de NT observadas em solos antropogênicos, atribui-se ao tipo e quantidade de biomassa vegetal das culturas agrícolas. Resultados obtidos por Falcão et al. (2009), justificam que os baixos teores de NT em solos antropogênicos da Amazônia Central, são devidas as condições de altas temperaturas e umidade, favorecendo a mineralização desse elemento presente na matéria orgânica do solo.

A mudança de uso da terra, de florestas nativas sobre sítios antropogênicos da Amazônia Central para sistemas de cultivos agrícolas praticados por pequenos produtores, com base nas condições em que esta pesquisa foi conduzida, resultou na perda de 124 Mg C ha^{-1} . Destaca-se que as práticas de manejo adotadas no tratamento QA-TPA e PC-TPA, apesar do preceito sustentável, ainda impactam

negativamente os estoques de carbono quando comparados com a floresta nativa (VN-TPA). O mesmo comportamento foi observado para o estoque de nitrogênio, mas nesse caso, as perdas foram de 5 Mg N ha^{-1} , merecendo destaque, ao maior estoque observado no tratamento CC-TPA.

O papel da floresta na manutenção da estabilidade do C e N por longos períodos, pode ser atribuído à maior deposição de material orgânico na superfície, que é intensificada devido à contribuição de resíduos vegetais mais lignificados (Mantovaneli et al., 2015). Por outro lado, para Iamaguti et al. (2015), no preparo convencional, o solo exposto e desagregado favorece maiores perdas de CO_2 , elevação da temperatura e, às vezes redução do conteúdo de água no solo.

As maiores reduções nos estoques de C e N observadas em PC-TPA, apesar da ausência do revolvimento e mobilização do horizonte antropogênico, provavelmente se devem à baixa produção de raízes e cobertura do solo por mais de quatro décadas.

Na Amazônia, o papel da biomassa e dos resíduos das culturas frutícolas no acúmulo e estoque de C, já foi reportado por Souza et al. (2020) quando destacaram maiores teores e estoque de C em áreas com plantio de cupuaçu. Cunha et al. (2017), estudando o efeito de diferentes coberturas sobre o acúmulo de C do solo, também observaram que algumas culturas agrícolas apresentam potencial para elevar esses teores mesmo quando comparado a remanescentes de floresta amazônica.

Já os maiores estoques de C e N em CC-TPA e CC-TM, refletem tanto o efeito dos resíduos das culturas agrícolas de ciclos curto e médio, quanto o efeito residual das adubações com esterco de aves, cujo histórico registra 10 e 15 Mg ha^{-1} , respectivamente. Destaca-se que no tratamento CC-TPA, essas alterações, também, podem ser explicadas por sua composição granulométrica (maior teor de silte) e pelo maior DMG, atributos que mantiveram alta correlação positivas com os conteúdos de C e N (Tab. 3). Estudos de Ramalho et al. (2022) relatam a importância das frações mais finas dos solos antropogênicos na estabilização e armazenamento da matéria orgânica do solo, reforçando o papel desses pedoambientes como modelo de otimização do sequestro de C e N.

5 CONCLUSÕES

A mudança de uso da terra de florestas para sistemas tradicionais e convencionais, especialmente aqueles com práticas agrícolas intensas, resulta em impactos negativos sobre a qualidade físico-estrutural e a capacidade de estoque de carbono e nitrogênio em solos antropogênicos da Amazônia Central.

Sistemas de uso tradicional, como os Quintais Agroflorestais, apresentam maior estabilidade estrutural e maiores estoques de carbono e nitrogênio em comparação com sistemas de monocultivo de citros.

A preservação de áreas com vegetação nativa demonstra ser crucial para a manutenção desses estoques, destacando a importância da adoção de práticas agrícolas sustentáveis nesses solos.

Os resultados apontam para a necessidade de pesquisas específicas orientadas sobre o manejo apropriado dos solos antropogênicos, a fim de mitigar os impactos da mudança de uso da terra sobre os estoques de carbono e do nitrogênio, e desta forma, promover a adoção de sistemas agrícolas mais resilientes e sustentáveis.

Recomenda-se, que as pesquisas futuras possam considerar a espessura total dos horizontes antropogênicos, bem como a variabilidade espacial dos seus indicadores (químicos, físicos e biológicos), com vistas a estimativa de índices mais qualificados de avaliação da qualidade dos Antrossolos da Amazônia brasileira.

REFERÊNCIAS

ABBASLOU H, HADIFARD H, GHANIZADEH AR (2020) Effect of cations and anions on flocculation of dispersive clayey soils. **Heliyon**, v. 6, n. 2, p. e03462. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844020303078>

ALHO CFBV, SAMUEL-ROSA A, MARTINS GC, HIEMSTRA T, KUYPER TW, TEIXEIRA, WG (2019) Spatial variation of carbon and nutrients stocks in Amazonian Dark Earth. **Geoderma** v. 337, p. 322–332. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.09.040>

ALMEIDA RG, CAMPOS MCC, DA SILVA DMP, DOS SANTOS RV, DE LIMA AFL, DA SILVA SOUZA RF, BEZERRA FA, ARAÚJO WO, DE OLIVEIRA FP (2024) Organic Carbon and Formation of Soil Aggregates on Areas of Natural Vegetation Converted to Pasture in Southern Amazonas. **Eurasian Soil Science**, v. 57, n. 6, p. 931–944, 2024. <https://link.springer.com/10.1134/S1064229323603281>

ALVARES CA, STAPE JL, SENTELHAS PC, DE MORAES GONÇALVES JL, SPAROVEK G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728.

ARAUJO MA, TORMENA CA, SILVA AP (2004). Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337–345.

AZEVEDO AC, BONUMÁ AS (2004) Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 609–617.

BATISTÃO AC, HOLTHUSEN D, REICHERT JM, SANTOS LAC, CAMPOS MCC (2020) Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma**, v. 363, p. 114130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130>

BIELUCZYK W, MERLOTI LF, CHERUBIN MR, MENDES LW, BENDASSOLLI JÁ, RODRIGUES RR, CAMARGO PB, VAN DER PUTTEN WH, TSAI SM (2023) Forest restoration rehabilitates soil multifunctionality in riparian zones of sugarcane production landscapes. **Science of The Total Environment**, v. 888, p. 164175. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0048969723027961>

BOUAJILA A, OMAR Z, MAGHERBI G (2021) Soil aggregation, aggregate-associated organic carbon, and total nitrogen under different land use in Regosols of coastal arid lands in Gabes, Tunisia. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 18, p. 1933. <https://link.springer.com/10.1007/s12517-021-08289-4>

BRITO WBM, COSTA CAMPOS MC, CAMPOS MANTOVANELLI B, DA CUNHA JM, FRANCISCON U, RODRIGUES SOARES MD (2018) Spatial variability of soil physical properties in Archeological Dark Earths under different uses in southern Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 182, n. May, p. 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.008>

CAMPOS MCC, RIBEIRO MR, SOUZA JÚNIOR VS, RIBEIRO FILHO MR, SOUZA RVCC, ALMEIDA MC (2011) Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia**, v. 70, n. 3, p. 598–609.

CAMPOS MCC, SANTOS LAC, SILVA DMP, MANTOVANELLI BC, SOARES MDR (2012) Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. **Revista agro@mbiente on-line**, v. 6, n. 2, p. 102. <http://revista.ufrr.br/index.php/agroambiente/article/view/682>

CARVALHO JLN, CERRI CEP, FEIGL BJ, PÍCCOLO MC, GODINHO VP, & CERRI CC (2009) Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, 103(2), 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.022>

CARVALHO MAC, PANOSSO AR, RIBEIRO TEIXEIRA EE, ARAÚJO EG, BRANCA-GLIONI VA, DALLACORT R (2018) Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. **Soil and Tillage Research**, v. 184, p. 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.004>

CHERUBIN MR, KARLEN DL, FRANCO ALC, TORMENA CA, CERRI CEP, DAVIES CA, CERRI CC (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, n. 2016, p. 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

COLLINS ME, & KUEHL RJ (2001) Organic matter accumulation and organic soils. In J. Richardson & M. Vepraskas (Eds.), *Wetland soils: Genesis, hydrology, landscapes, and classification* (pp. 137–161). **Lewis Publishers**.

CRAUL PHILLIP J (1999) *Urban soils: applications and practices*. **John Wiley & sons**.
CULTRERA M, CHRISTINA MAM, FERREIRA FC (2012) Agricultura urbana e conservação de agrobiodiversidade: um estudo de caso em Mato Grosso, Brasil. **Sitientibus série Ciências Biológicas**, v. 12, n. 2, p. 323–332.

CUNHA JM, CAMPOS MCC, GAIO DC, DE SOUZA ZM, SOARES MDR, DA SILVA DMP, SIMÕES EL (2018) Spatial variability of soil respiration in Archaeological Dark Earth areas in the Amazon. **Catena** (Amst) 162, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.001>

CUNHA JM, GAIO DC, COSTA CAMPOS MC, RODRIGUES SOARES MD, PINHEIRO SDM, LEITE LAF (2017) Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, v. 12, n. 2, p. 263.

DENEVAN (2009) As Origens Agrícolas da Terra Mulata na Amazônia. In: TEIXEIRA WG. et al. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1. ed. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. p. 82 - 86.

FALCÃO NPS, MOREIRA A, COMENFORD NB (2009) A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia central. **As Terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**, p. 189–200.

FERREIRA EB, CAVALCANTI PP, NOGUEIRA DA (2021) *_ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)_*. **R package version 1.2.2**, <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>

FROZZI JC, DA CUNHA JM, CAMPOS MCC, BERGAMIN AC, BRITO WBM, FRANCISCON U, DA SILVA DMP, DE LIMA AFL, DE BRITO FILHO EG (2020) Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. **Environmental Earth Sciences**, v. 79, n. 11, p. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08948-x>

GLASER B (2007) 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, n. 1478, p. 187–196. <https://doi.org/10.1098/rstb.2006.1978>

GLASER B, BIRK JJ (2012) 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. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>

GONZÁLEZ OF, BAQUERO-ECHEVERRI S, CAICEDO-GARCÍA JP, LOAIZA-USUGA JC, POLANÍA J (2024) Soil quality: an indicator of recovery in a nature reserve in the Colombian Andes. **Agroforestry Systems**. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00951-y>

HARRELL JRF (2024) `_Hmisc: Harrell Miscellaneous_`. **R package version 5.1-3**, <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>

IAMAGUTI JL, MOITINHO MR, TEIXEIRA DDB, BICALHO ES, PANOSSO AR, LA SCALA JUNIOR N (2015) Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 5, p. 497–504. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi>

IPCC (2019) Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: An IPCC Special Report on Climate Change. in: **Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse Gas Fluxes in Terrestrial Ecosystems**.

IUSS WORKING GROUP WRB (2014) World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **FAO**, v.106.

KEMPER WD, CHEPIL WS (1965) Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: **American Society of Agronomy**. v.1, p.499-509.

KIM JS, SPAROVEK G, LONGO RM, DE MELO WJ, CROWLEY D (2007) Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.010>

LAL R (2009) Sequestering Atmospheric Carbon Dioxide. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v. 28, n. 3, p. 90–96. <https://doi.org/10.1080/07352680902782711>

LEE BJ, SCHLAUTMAN MA, TOORMAN E, FETTWEIS M (2012) Competition between kaolinite flocculation and stabilization in divalent cation solutions dosed with anionic polyacrylamides. **Water Research**, v. 46, n. 17, p. 5696–5706. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.07.056>

LEHMANN J, PEREIRA SJR, STEINER C, NEHLS T, ZECH W, GLASER B (2003) 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.

LIMA AFL, CAMPOS MCC, ENCK BF, DA SILVA SIMÕES W, DE ARAÚJO RM, DOS SANTOS LAC, DA CUNHA JM (2021) Physical soil attributes in areas under forest/pasture conversion in northern Rondônia, Brazil. **Environ Monit Assess**. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09682-y>

LIMA AFL, CAMPOS MCC, SILVA JB, ARAÚJO WO, MANTOVANELLI BC, SOUZA FG, BEIRIGO RM, SILVA DMP, MACEDO RS, OLIVEIRA FP (2024) The Stability of Aggregates in Different Amazonian Agroecosystems Is Influenced by the Texture, Acidity, and Availability of Ca and Mg in the Soil. **Agronomy**, v. 14, n. 4, p. 677. <https://doi.org/10.3390/agronomy14040677>

LIMA HN, SCHAEFER CER, MELLO JWV, GILKES RJ, KER JC (2002) Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00141-6)

LOMBARDO U et al. (2022) Evidence confirms an anthropic origin of Amazonian Dark Earths. **Nature Communications**, 13(1), 3444. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2>

LUCIANO RV, BERTOL I, BARBOSA FT, KURTZ C, FAYAD JA (2010) Propriedades físicas e carbono orgânico do solo sob plantio direto comparados à mata natural, num Cambissolo Háplico. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, 9 (1): 09-19. 1676-9732.

MANTOVANELLI BC, SILVA DAP, CAMPOS MCC, GOMES RP, SOARES MDR, SANTOS LAC (2015) Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 58, n. 2, p. 122–130. <https://doi.org/10.4322/rca.1822>

MELO TR, PEREIRA MG, SHIMIZU GD, BARBOSA GMC, TAVARES J (2022) Aggregation rate as a function of soil organic matter in heavy clayey Ferralsols. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 46. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20220035>

NELSON DW; SOMMERS LE (1996) Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In **Methods of Soil Analysis** (eds D.L. Sparks, A.L. Page, P.A. Helmke, R.H. Loeppert, P.N. Soltanpour, M.A. Tabatabai, C.T. Johnston and M.E. Sumner). <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c34>

NOVOTNY EH, HAYES MHB, MADARI BE, BONAGAMBA TJ, DEAZEVEDO ER, DE SOUZA AA, SONG G, NOGUEIRA CM, MANGRICH AS (2009) Lessons from the Terra Preta de Índios of the Amazon Region for the Utilisation of Charcoal for Soil Amendment. **J. Braz. Chem. Soc**, v. 20, n. 6, p. 1003–1010

OLIVEIRA PR, CENTURION JF, CENTURION MAPC, ROSSETTI KV, FERRAUDO AS, FRANCO HBJ, PEREIRA FS, BÁRBARO JÚNIOR LS (2013) Qualidade estrutural de um latossolo vermelho submetido à compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 3, p. 604–612. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000300006>

PIERI CJMG (1992) Fertility of soils: a future for farming in the west African Savannah. Berlin: **Springer-Verlag**. 348 p.

PINTO LAS, MORAIS IS, OZÓRIO JMB, DE MELO TR, ROSSET JS, PEREIRA MG (2023) Soil aggregation and associated organic matter under management systems in sandy-textured soils, subtropical region of Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, p. 253. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10892-1>

R CORE TEAM (2023) **_R: A Language and Environment for Statistical Computing_**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

RAMALHO B, DIECKOW J, DE FREITAS MELO V, GARDNER BROWN G, LUZIA SIMON P, ALVES IBARR M, CUNHA L, KILLE P (2022) Carbon and nitrogen storage and stability by mineral-organic association in physical fractions of anthropogenic dark earth and of reference soils in Amazonia. **CATENA**, v. 213, p. 106185. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106185>

RAYOL BP, MIRANDA IS (2019) Quintais agroflorestais na Amazônia Central: caracterização, importância social e agrobiodiversidade. **Ciência Florestal**, v. 29, n. 4, p. 1614–1629. <https://doi.org/10.5902/1980509829853>

REYNOLDS WD, BOWMAN BT, DRURY CF, TAN CS, LU X (2002) Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, n. 1–2, p. 131–146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

RIBEIRO HMS, SILVA FAM, PINTO RB, FALCÃO NPS, SILVA RB (2023) Indicadores de qualidade e ocorrência de solos antropogênicos na Amazônia central: uma revisão sistemática. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 23, n. 1, p. 89–104.

RODRIGUES AF, LATAWIEC AE, REID BJ, SOLÓRZANO A, SCHULER AE, LACERDA C, FIDALGO ECC, SCARANO FR, TUBENCHLAK F, PENA I, VICENTE-VICENTE JL, KORYS KA, COOPER M, FERNANDES NF, PRADO RB, MAIOLI V, DIB V, TEIXEIRA WG (2021) Systematic review of soil ecosystem services in tropical regions. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 3, p. rsos.201584. <https://doi.org/10.1098/rsos.201584>

SÁ IB, CUNHA TJF, TEIXEIRA AHC, ANGELOTTI F, DRUMOND FM (2010) Desertificação no Semiárido brasileiro. **ICID+18 2a Conferência Internacional: Clima, Sustentabilidade e Desenvolvimento em Regiões Semiáridas**, Fortaleza.

SANTOS LAC, CAMPOS MCC, DE AQUINO RE, BERGAMIN AC, DA SILVA DMP, MARQUES JUNIOR J, FRANÇA ABC (2013) Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 4, p. 825–836. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400001>

SCHALLER FW; STOCKINGER KR (1953) A Comparison of Five Methods for Expressing Aggregation Data. **Soil Science Society of America Journal**, 17: 310-313. <https://doi.org/10.2136/sssaj1953.03615995001700040002x>

SCHELLEKENS J, ALMEIDA-SANTOS T, MACEDO RS, BUURMAN P, KUYPER TW, VIDAL-TORRADO P (2017) Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia — A pyrolysis-GC/MS study. **Geoderma**, v. 288, p. 154–165, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.001>

SEGNINI A, CARVALHO JLN, BOLONHEZI D, MILORI DMBP, SILVA WTL, DA SIMÕES ML, CANTARELLA H, MARIA IC, DE MARTIN-NETO L (2013) Carbon stock and humification index of organic matter affected by sugarcane straw and soil management. **Sci Agric** 70, 321–326. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162013000500006>

SIGMAPLOT (2007) **Scientific Graphing Software: version 11.0**. San Rafael: Hearne Scientific Software.

SILVA LI, CAMPOS MCC, WADT PGS, CUNHA JM, OLIVEIRA IA, FREITAS L, SANTOS EAN, BRITO FILHO EG (2020) Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob diferentes manejos e métodos. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 40, p. 40–48, 2020. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2020.162486>

SILVA SA, LIMA JSS, XAVIER AC, TEIXEIRA MM (2010) Variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo Húmico cultivado com café. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 15–22.

SMITH NJH (1980) Anthrosols and human carrying capacity in Amazonia. **Annals of the Association of American Geographers**, 70(4), 553–566. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1980.tb01332.x>

SOARES MDR, CAMPOS MCC, CUNHA JM, WECKNER FC, BRITO FILHO E, MANTOVANELI BC, LEITE AFL (2018) Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 125–133. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOARES MDR, DE SOUZA ZM, CAMPOS MCC, DA SILVA RB, ESTEBAN DAA, NORONHA RL, DOS SANTOS GOMES MG, DA CUNHA JM (2021) Land-use change and its impact on physical and mechanical properties of Archaeological Black Earth in the Amazon rainforest. **CATENA**, v. 202, n. August 2020, p. 105266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105266>

SOMBROEK W, RUIVO MDL, FEARNSSIDE PM, GLASER B, LEHMANN J (2006) Amazonian Dark Earths as Carbon Stores and Sinks. Em: **AMAZONIAN DARK EARTHS**. Dordrecht: **Kluwer Academic Publishers**. p. 125–139. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_7

SOUZA FG, CAMPOS MCC, PINHEIRO EN, LIMA AFL, BRITO FILHO EG, CUNHA JM, SANTOS EAN, BRITO WBM (2020) Aggregate stability and carbon stocks in Forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil. **Carbon Management**, v. 11, n. 1, p. 81–96. <https://doi.org/10.1080/17583004.2019.1694355>

SOUZA GS, SOUZA ZM, SILVA RB, BARBOSA RS, ARAÚJO FS (2014) Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 1, p. 135–146. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000100013>

SOUZA ZA, LEITE JA, BEUTLER NA (2004) comportamento de atributos físicos de um latossolo amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal 24, 654–662.

TAIYUN W; VILIAM S (2021) R package 'corrplot': **Visualization of a Correlation Matrix (Version 0.92)**. Available from <https://github.com/taiyun/corrplot>

TEIXEIRA PC, DONAGEMMA GK, FONTANA A, TEIXEIRA WG (2017) Manual e Métodos de Análise de Solo, 3a edição. ed. **Brasília**. http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/Liccom_Camejo_2011-07-28.pdf

TEIXEIRA WG, MARTINS GC (2003) Soil Physical Characterization. In: Lehmann, J., Kern, D.C., Glaser, B., Wodos, W.I. (eds) *Amazonian Dark Earths*. **Springer**, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_15

TEIXEIRA WG, MARTINS GC, COELHO MR, MARTINS JS, SHINZATO E (2005) As Terras Pretas de Índio no Distrito Agropecuário da Suframa. **Suframa**. Manaus, p.1-13.

TEIXEIRA WG., MARTINS GC, MACEDO RS, NEVES JUNIOR AF, MOREIRA A, BENITES VM, STEINER C (2009) 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. (Eds). **As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental. p. 242-250.

TENELLI S, DE OLIVEIRA BR, BARBOSA LC, CARVALHO JLN (2019) Can reduced tillage sustain sugarcane yield and soil carbon if straw is removed?. **BioEnergy Research**, v. 12, n. 4, p. 764–777. <https://doi.org/10.1007/s12155-019-09996-3>

USDA (2017) United States Department of Agriculture. Soil Science Division Staff. Soil Survey Manual; Ditzler, C., Scheffe, K., Monger, H.C., Eds.; **USDA Handbook 18**; Government Printing Office: Washington, DC, USA.

VELDKAMP E (1994) Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, 58: 175-180. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>

VENABLES WN; RIPLEY BD (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. **Springer**, New York. ISBN 0-387-95457-0.

VIEIRA MJ, MUZILLI O (1995) Características físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 19, n. 7, p. 873-882.

WICKHAM H, AVERICK M, BRYAN J, CHANG W, MCGOWAN LD, FRANÇOIS R, GROLEMUND G, HAYES A, HENRY L, HESTER J, KUHN M, PEDERSEN TL, MILLER E, BACHE SM, MÜLLER K, OOMS J, ROBINSON D, SEIDEL DP, SPINU V, TAKAHASHI K, VAUGHAN D, WILKE C, WOO K, YUTANI H (2019) “Welcome to the tidyverse.” **Journal of Open Source Software**, 4*(43), 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

WOODS W, DENEVAN W (2009) Amazonian Dark Earths: The First Century of Reports. In: Woods, W.I., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Steiner, C., WinklerPrins, A., Rebellato, L. (eds) Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision. **Springer**, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8_1

XU H, YUAN H, YU M, CHENG X (2020) Large macroaggregate properties are sensitive to the conversion of pure plantation to uneven-aged mixed plantations. **CATENA**, v. 194, p. 104724. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104724>

YEASMIN S, UDDIN MK, CHOWDHURY MAH, MOHIUDDIN KM, SAHA BK (2024) Poultry manure-urea fertilizer potentially influences nitrogen use efficiency, nutritional quality, and yield of baby corn (*Zea mays* L.). **Journal of Agriculture and Food Research**, v. 18, p. 101409. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101409>

ZHAO Z, MAO Y, GAO S, LU C, PAN C, LI X (2023) Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management practices in a rice–wheat cropping system. **Scientific Reports**, 13(1), 3665. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30541-y>

CAPÍTULO 4 – DISCRIMINAÇÃO DE IMPACTOS E AGRUPAMENTO DE INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICO-MECÂNICA DO SOLO EM SÍTIOS ANTROPOGÊNICOS DA AMAZÔNIA BRASILEIRA

RESUMO – Os solos antropogênicos da Amazônia, conhecidos por sua alta fertilidade, estão cada vez mais sujeitos à pressão do uso agrícola intensivo, o que pode comprometer sua estrutura e funcionalidade ao longo do tempo. Nesse contexto, a compreensão dos impactos do manejo e da mudança no uso da terra sobre as propriedades físico-mecânicas desses solos é essencial para subsidiar estratégias de conservação e manejo sustentável. Esta pesquisa teve como objetivo quantificar e discriminar os impactos do uso e manejo do solo, agrupando indicadores que melhor descrevam as alterações físico-mecânicas de solos antropogênicos na Amazônia Central. O estudo foi realizado em cinco *plots* experimentais no município de Manacapuru, Amazonas, abrangendo diferentes sistemas de uso da terra, incluindo floresta nativa, quintal agroflorestal e áreas sob cultivos frutícolas com diferentes manejos. As amostras de solo foram coletadas em três camadas (0,00 - 0,10 m, 0,10 - 0,20 m e 0,20 - 0,30 m) e analisadas quanto à granulometria, densidade do solo, porosidade total, teor de carbono orgânico total, resistência do solo ao cisalhamento (RC) pressão de pré-consolidação (σ_p), índice de cone (IC), e índice de compressão (m). Os resultados indicaram que os diferentes usos do solo impactaram significativamente a estrutura dos horizontes antropogênicos, sendo que o manejo convencional promoveu maior compactação e redução da qualidade física do solo, especialmente nas áreas de cultivo mecanizado. Os solos sob floresta nativa apresentaram maiores teores de carbono orgânico e menor densidade do solo, enquanto as áreas manejadas convencionalmente tiveram aumento na pressão de pré-consolidação e resistência ao cisalhamento. O quintal agroflorestal, por sua vez, demonstrou um impacto intermediário, mantendo parte da qualidade estrutural do solo. A integração de indicadores físico-mecânicos na avaliação da qualidade do solo pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de conservação e uso desses solos na Amazônia.

Palavras-chave: Amazônia Central, Compactação do solo, Manejo sustentável, Resistência mecânica, Uso e manejo do solo

CHAPTER 4 – DISCRIMINATION OF IMPACTS AND CLUSTERING OF INDICATORS OF SOIL PHYSICAL-MECHANICAL QUALITY IN ANTHROPOGENIC SITES OF THE BRAZILIAN AMAZON

ABSTRACT – Anthropogenic soils of the Amazon, known for their high fertility, are increasingly subjected to the pressure of intensive agricultural use, which may compromise their structure and functionality over time. In this context, understanding the impacts of management and land-use change on the physical-mechanical properties of these soils is essential to support conservation strategies and sustainable management practices. This study aimed to quantify and discriminate the impacts of soil use and management by clustering indicators that best describe the physical-mechanical changes in anthropogenic soils in the Central Amazon. The study was conducted in five experimental plots in the municipality of Manacapuru, Amazonas, encompassing different land-use systems, including native forest, agroforestry backyard, and fruit crop areas under different management practices. Soil samples were collected from three depths (0.00–0.10 m, 0.10–0.20 m, and 0.20–0.30 m) and analyzed for particle size distribution, soil bulk density, total porosity, total organic carbon content, soil shear strength (SS), preconsolidation pressure (σ_p), cone index (CI), and compression index (m). The results indicated that different land uses significantly impacted the structure of anthropogenic horizons, with conventional management promoting greater compaction and a reduction in soil physical quality, especially in mechanized cropping areas. Soils under native forest exhibited higher organic carbon content and lower bulk density, whereas conventionally managed areas showed increased preconsolidation pressure and shear strength. The agroforestry backyard, in turn, demonstrated an intermediate impact, preserving part of the soil's structural quality. Integrating physical-mechanical indicators into soil quality assessments can contribute to developing more effective conservation and land-use strategies for these soils in the Amazon.

Keywords: Central Amazon, Soil compaction, Sustainable management, Mechanical resistance, Soil use and management

1 INTRODUÇÃO

A expansão agrícola na região amazônica tem sido expressiva ao longo do tempo, e o avanço dessa atividade econômica tem promovido mudanças no uso da terra (MUT) de ambientes preservados para agrossistemas. No norte do Brasil, esse processo é evidenciado pelos crescentes índices no desmatamento, e pelo aumento da produção agrícola em estados inseridos na região da Amazônia Legal. A conversão da floresta nativa por vegetação menos densa, associada ao manejo convencional e indiscriminado dos solos, pode estar impactando a qualidade físico-mecânica dos solos, principalmente aqueles que apresentam horizonte A antrópico.

Os solos antropogênicos ou Antrossolos amazônicos, são tipos de solo com presença de horizonte A antrópico, e representam entre 0,1 a 0,3% do território da Amazônia brasileira (Sombroek et al., 2006). Esses pedoambientes, formados a partir da ocupação humana há milhares de anos (Lombardo et al., 2022), apresentam elevadas quantidades de matéria orgânica estável e são altamente férteis, o que os diferenciam dos solos adjacentes (Cunha et al., 2018; Batistão et al., 2020).

A estabilidade da fertilidade e a coloração escura dessas terras estão associadas à intensa e prolongada incorporação de carbono na forma de carvão pirogênico (biochar), resultante da combustão incompleta de resíduos vegetais e animais, oriundos de atividades humanas, decorrentes de assentamentos e práticas agrícolas desenvolvidas por povos indígenas pré-colombianos (Smith, 1980; Santos et al., 2018; Schellekens et al., 2017; Campos et al., 2011).

Os sítios arqueológicos de Terra Preta da Amazônia (TPA) e Terras Mulatas (TM), são identificados a partir do desmatamento da floresta amazônica, e a fertilidade desses solos, ainda nos dias atuais, tem despertado crescente interesse entre pequenos e médios agricultores. Por esse motivo, o cultivo de espécies frutíferas e hortícolas tem sido comum nesses solos, principalmente em comunidades ribeirinhas situadas às margens do Rio Amazonas e do Rio Manacapuru, um importante rio da Bacia Amazônica.

As características inerentes à qualidade química dos solos antropogênicos ou Antrossolos amazônicos (altos teores de C orgânico, Ca, Mg, P e micronutrientes) favorecem o cultivo de espécies domesticadas com pouco ou nenhuma adição de fertilizantes minerais (Lima et al., 2002; Teixeira et al., 2005; Kim et al., 2007; Teixeira et al., 2009).

Outro aspecto desses solos antropogênicos da Amazônia, é que, geralmente, são inferiores a um hectare (Sombroek et al., 2006), e seu uso é predominantemente realizado por comunidades tradicionais e indígenas, nas quais a agricultura é tradicionalmente praticada por meio de uma técnica de manejo denominada “corte e queima”, ou na formação de ambientes conhecidos como quintais agroflorestais, ambos caracterizados pela ausência de revolvimento do solo (Falcão et al., 2009; Gervazio et al., 2022).

Atualmente, os solos antropogênicos têm sido submetidos a uma diversidade de usos e manejos da terra, especialmente aqueles próximos à região metropolitana de Manaus. O tamanho da propriedade rural, o tipo de cultura agrícola e o conhecimento tradicional da comunidade assentada ou produtor rural, são fatores determinantes na escolha do manejo a ser adotado. Nota-se que, nas últimas décadas, a busca por maiores níveis de produtividade na Amazônia tem incentivado comunidades de pequenos e médios agricultores a adotarem a mecanização agrícola em diferentes etapas do manejo, como o preparo do solo com grade aradora e niveladora, subsolação e colheita mecanizada de grãos e frutos.

Isto posto, entende-se que a exemplo do praticado nas extensas áreas agrícolas do Brasil e do mundo, a falta de boas práticas agrícolas e o preparo inadequado dos solos antropogênicos, devem provocar danos à sua estrutura ao longo do tempo, especialmente nas camadas mais superficiais do horizonte antrópico. Segundo Silva et al. (2003), o tráfego contínuo de máquinas agrícolas é um dos principais fatores responsáveis por alterações nos atributos físicos, hídricos e mecânicos do solo. Além disso, diversas pesquisas indicam que somente a mudança de uso da terra, ou a substituição de florestas nativas por agrossistemas, resulta em perdas substanciais de carbono do solo, implicando na deterioração da saúde do solo por consequência de alterações permanentes na sua qualidade estrutural, o que favorece ao processo de compactação e erosão (Assefa et al., 2017; Bieluczyk et al., 2023).

Estudos sobre o impacto das práticas agrícolas ou mudança do uso da terra têm ganhado atenção global, uma vez que as alterações na saúde do solo têm efeito direto na emissão de gases de efeito estufa (Cherubin et al., 2016; Rodrigues et al., 2021; González et al., 2024). E, embora esteja claro que os indicadores físicos, químicos e biológicos do solo são capazes de fornecer uma medida das condições do

solo (Lal, 1999), sabe-se que nem todos os atributos atendem o critério de sensibilidade às alterações de uso e manejo do solo (Bochner, 2007).

A qualidade dos solos antropogênicos tem sido avaliada principalmente por indicadores químicos, sob a justificativa da forte relação desses solos com a fertilidade e a produtividade das culturas agrícolas (Ribeiro et al., 2023). No entanto, esses solos também apresentam características físicas que os diferenciam dos horizontes superficiais de solos adjacentes ou não antrópicos (Teixeira et al., 2009). Ainda assim, são escassas as pesquisas que investigaram os efeitos do manejo nos atributos físicos e mecânicos desses solos.

Teixeira et al. (2003) constataram a alta resiliência de uma Terra Preta da Amazônia, mesmo após uso intensivo por mais de 30 anos, com utilização de mecanização agrícola. Todavia, algumas pesquisas recentes trazem evidências de que a mudança de uso da terra em solos antropogênicos resulta em degradação física e química desses pedoambientes (Brito et al., 2018; Frozzi et al., 2020; Soares et al., 2018).

Contudo, ressalta-se que grande parte dos estudos sobre a qualidade físico-mecânica dos solos antropogênicos ainda se restringe à quantificação da resistência do solo à penetração (RP), bem como às variáveis relacionadas à constituição da massa e volume do solo (Brito et al., 2018; Santos et al., 2018). Nesse contexto, a integração dos atributos físicos e mecânicos, como a resistência do solo ao cisalhamento (RC), a pressão de préconsolidação (σ_p), o índice de cone (IC), e o índice de compressão do solo (m) em função do conteúdo de água e dos materiais orgânicos, entre outros, representa uma iniciativa importante para compreender a fragilidade e a resiliência dessas áreas (Soares et al., 2021), especialmente em locais manejados convencionalmente (Ribeiro et al., 2023).

O desenvolvimento de pesquisas científicas com esse enfoque, pode gerar resultados relevantes, uma vez que persiste uma lacuna de conhecimento sobre o impacto da ocupação e práticas antrópicas, bem como da mudança de uso da terra em sítios antropogênicos na Amazônia.

A pressão de préconsolidação é um método amplamente utilizado (Dias Júnior et al., 2004; Esteban et al., 2020; Silva et al., 2022), e tem sido empregado como indicador dos impactos de diferentes usos e manejos na estrutura do solo (Awe et al., 2020; Esteban et al., 2020). A utilização desse parâmetro como indicador da qualidade mecânica do solo é importante para a gestão de um manejo mais sustentável, pois

permite a predição do comportamento compressivo do solo, assim como, a resposta do solo de suportar cargas sem que a sua estrutura seja comprometida irreversivelmente (Silva et al., 2010).

Ao pesquisar os impactos da mudança de uso da terra em solos antropogênicos da Amazônia, Soares et al. (2021) verificaram que a pressão de préconsolidação foi sensível às alterações causadas pelos diferentes usos do solo, e permitiu identificar uma maior ocorrência de compactação em um agrossistema de pastagem, em comparação com a área cultivada com feijão-guandu. Este foi um estudo isolado e não considerou a influência das práticas convencionais de preparo do solo, restringindo-se à análise das camadas mais superficiais dos horizontes antrópicos. Adicionalmente, entende-se que os efeitos causados pela ocupação de comunidades tradicionais e indígenas, com a formação de agrossistemas como os quintais agroflorestais, também deve ser quantificado.

A hipótese deste estudo é que a mudança no uso da terra, com a substituição de florestas por sistemas agrícolas, afeta o comportamento físico-mecânico do horizonte antrópico das Terras Pretas e Terras Mulatas da Amazônia, com impactos mais significativos sob práticas agrícolas mecanizadas (preparo convencional) em comparação com manejos tradicionais e mais sustentáveis, como os quintais agroflorestais. Portanto, esta pesquisa teve como objetivo quantificar e discriminar o impacto do uso e manejo do solo, agrupando indicadores que melhor descrevam as alterações físico-mecânicas de solos antropogênicos da Amazônia Central, a partir de diferentes abordagens de análise dos atributos do solo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição da área de estudo

O estudo foi realizado no município de Manacapuru, na Amazônia Central brasileira ($3^{\circ}17'22,98''\text{S}$ $60^{\circ}37'54,85''\text{O}$), a 34 m acima do nível do mar. De acordo com a classificação Köppen, o clima da região da pesquisa é da classe Af, com temperaturas médias variando de 28 a 26°C e precipitação média anual de 2.648 mm (Alvares et al., 2013), sendo o período de maio-novembro o mais seco e dezembro-abril o mais chuvoso (Fig. 1).

A pesquisa incluiu cinco *plots* experimentais em duas comunidades rurais contendo sítios arqueológicos: a) comunidade Costa do Laranjal, às margens do Rio Amazonas ($3^{\circ}18'18,5''\text{S}$ $60^{\circ}29'26,29''\text{O}$), e b) comunidade Conceição II, às margens do Rio Manacapuru ($3^{\circ}14'42,62''\text{S}$ $60^{\circ}41'08,98''\text{O}$), distantes 23 km entre si, e circundadas por uma área total de 843 km² (Fig. 2). Os solos desta pesquisa foram classificados como Antrossolos de acordo com a classificação IUSS Working Group WRB, (2014).

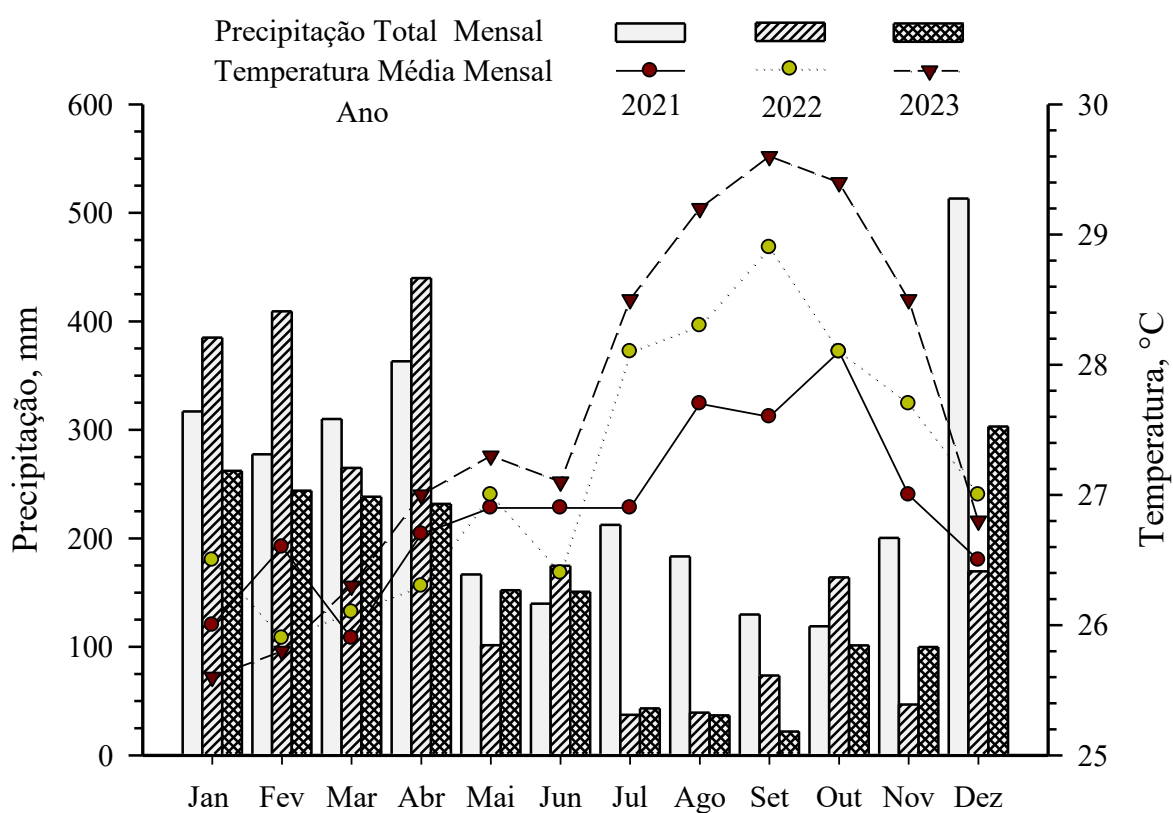


Figura 1. Série de dados meteorológicos (total de chuvas mensal e temperatura média mensal) referente aos anos 2021, 2022 e 2023, no município de Manacapuru, estado do Amazonas, Brasil. Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia - INMET <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>.

Os tratamentos foram definidos de acordo com o tipo de uso e manejo do solo sobre uma mancha contínua de Terra Preta Amazônica (TPA) e em uma Terra Mulata (TM), descritos como:

I) Remanescente de floresta nativa sobre Terra Preta Amazônica, com cobertura vegetal primária e porte variado de espécies, preservada há mais de 100 anos (VN-TPA);

II) Quintal agroflorestal sobre Terra Preta Amazônica, com cobertura vegetal remanescentes de floresta amazônica em porte variado consorciado com culturas frutícolas introduzidas aleatoriamente (mangueira, cupuaçuzeiro, cacaueiro), com presença de pequenos animais e moradias, em uso tradicional por uma família de ribeirinhos descendentes de indígenas há 90 anos, sem a prática de revolvimento do solo (QA-TPA);

III) Área com plantio de Mamão (*Carica papaya* L.) variedade Calimosa, sobre Terra Preta Amazônica, com rotação de culturas (mamão – banana - milho) e práticas convencionais de preparo do solo, incluindo subsolagem e coleta mecanizada, utilizando trator Yanmar Agritech 1175S (3431 kg). A adubação é realizada com aplicação média de 10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de composto orgânico formulado à base de esterco de galinha, em uso há 35 anos (CC-TPA);

IV) Área com pomar de citros em sistema de monocultivo sobre Terra Preta Amazônica em uso há 43 anos, caracterizada pelo plantio de Laranja-pera (*Citrus sinensis*), com capinas constantes para o combate das plantas indesejadas, sem adubação e sem revolvimento do solo (PC-TPA);

V) Área com plantio de Mamão (*Carica papaya* L.) variedade Calimosa, sobre terra mulata, com sistema de rotação de culturas (mamão – pimenta malagueta) e práticas convencionais de preparo do solo, incluindo grade aradora, grade niveladora e coleta mecanizada, utilizando trator Agrale 5075,4 (3220 kg). A adubação é realizada com aplicação média de 15 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ de composto orgânico formulado à base de esterco de galinha, em uso há 20 anos (CC-TM) (Fig. 2).



Figura 2. Localização da área de estudo em sítios arqueológicos da Amazônia Central brasileira. Remanescente de floresta nativa em terra preta (VN-TPA), quintal agroflorestal em terra preta (QA-TPA), plantio de mamão em terra preta (CC-TPA), pomar de citros em terra preta (CO-ADE), plantio de mamão em terra mulata (CC-TM). As fotos foram tiradas em dezembro de 2023, e a imagem da localização dos sítios arqueológicos foi adquirida utilizando o Google Earth Pro.

2.2 Coleta e preparo de amostras de solo

Nos *plots* experimentais dedicados a cada tratamento, foram abertas quatro trincheiras de dimensão 1,5 m x 1,0 m x 0,40 m distanciadas a 20 m. Nas áreas com plantio agrícola, as trincheiras foram delimitadas nas entre linhas de cultivo. Foram coletadas amostras do tipo deformadas e com estrutura preservada. As amostras indeformadas (com estrutura preservada) foram coletadas com anéis volumétricos de 0,0635 m de diâmetro e 0,0254 m de altura. As avaliações foram realizadas nas camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m, e 0,20 – 0,30 m, coletando-se vinte amostras indeformadas por camada do solo em cada tratamento, totalizando 300 amostras indeformadas.

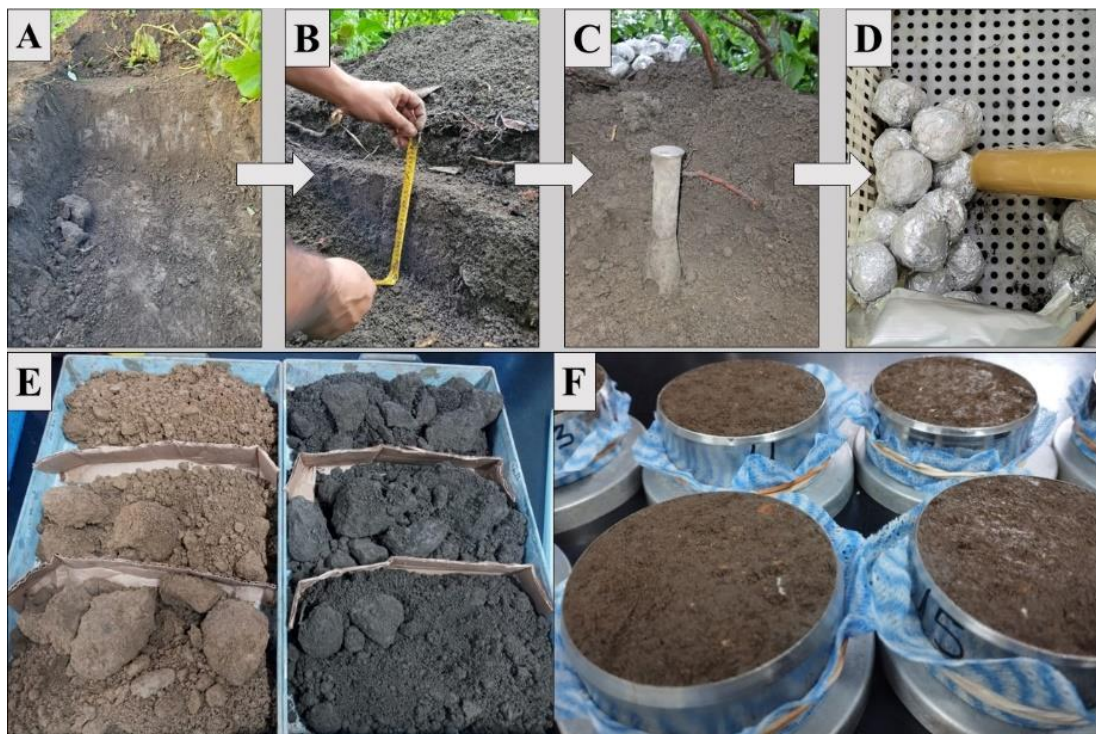


Figura 3. Coleta de solo e preparo das amostras com estrutura preservada e deformada. A sequência de “A-D”, indica as etapas de amostragem no campo. As imagens “E” e “F” demonstram os tipos de amostras deformada e indeformada, respectivamente.

Essas amostras indeformadas foram preparadas em laboratório para a determinação pressão de préconsolidação (σ_p), índice de compressão (m), índice de cone (IC), e densidade do solo (D_s) (Fig. 3F). O material de solo deformado foi obtido pela

fragmentação de torrões de solo, retirados das paredes das trincheiras, respeitando a profundidade de cada camada. Esse material foi seco ao ar e em seguida peneirado para determinação da granulometria das partículas do solo (teores de argila, silte e areia), densidade das partículas do solo (D_p), limite de plasticidade (LP), e conteúdo de carbono orgânico total (COT).

2.3 Análise do solo

A granulometria das partículas do solo foi avaliada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 N como dispersante químico, e agitação mecânica em aparato de alta rotação por 10 minutos. A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte calculado pela diferença entre a argila total e areia total. A densidade das partículas do solo (D_p) foi determinada pelo método do balão volumétrico (Teixeira et al., 2017), e o conteúdo de carbono orgânico total (COT) foi quantificado em alíquotas de $\pm 0,25$ g de solo pelo método da combustão seca (Nelson e Sommers, 1996), utilizando um analisador elementar com capacidade de determinação macro, modelo CNS982 – LECO.

As avaliações da resistência do solo ao cisalhamento (RC) foram realizadas no campo, pelo método tangencial, considerando apenas a camada superficial do solo (0,00 – 0,05 m), pois é na superfície que ocorre a ação dos rodados e implementos das máquinas, bem como o impacto das gotas de chuva no solo.

Para essa medida, utilizou-se um equipamento denominado cisalhômetro, desenvolvido por Silva e Lanças (2006) (Fig. 4). O procedimento consistiu em cravar o prato cisalhante nº 1 (área total de 23,75 cm² e área cisalhante de 11,9 cm², definida pela porção de solo contida pelas aletas dispostas em 125°) e submetê-lo ao torque necessário para cisalhar (cortar/romper) o solo por rotação.

Para a construção das envoltórias de Coulomb, foram aplicados quatro níveis conhecidos de tensão normal (σ_{n1} , σ_{n2} , σ_{n3} e σ_{n4}): 162,5; 325; 487,5 e 650 kPa, com seis repetições. Esses valores possibilitam quantificar a resposta do solo ao esforço aplicado, resultando em quatro tensões de cisalhamento correspondentes (τ_1 , τ_2 , τ_3 e τ_4). Com base no conjunto de tensões normais e de cisalhamento ($\sigma_{n1}\phi_1$), foram construídas as envoltórias de resistência de Coulomb e ajustadas às respectivas equações, de acordo com o modelo a seguir:

$$\tau_c = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

em que τ_c = a tensão cisalhante (kPa); c = o intercepto de coesão (kPa); σ_n = a tensão normal (kPa) e $\tan \phi$ = o coeficiente de atrito, cujo arco ϕ é o ângulo de atrito interno do solo.



Figura 4. Coleta de dados no campo para avaliação da resistência do solo ao cisalhamento, utilizando um cislhometro desenvolvido por Silva e Lanças (2006).

Para avaliar efeito da água no comportamento mecânico dos solos antropogênicos, e a sua relação com cada tratamento, amostras com estrutura preservada (corpos-de-prova) com 0,0635 m de diâmetro e 0,0254 m de altura foram saturadas com água por capilaridade e, em seguida, equilibradas em umidades pré-definidas, adequadas ao estudo de compressibilidade (determinação de σ_p e m), e do índice de cone (IC).

O estudo do índice de cone (IC) foi realizado nas mesmas amostras indeformadas e sob os mesmos conteúdos de água utilizados nos ensaios de compressibilidade. O equipamento utilizado foi o penetrômetro eletrônico (Marconi - MA933) com

velocidade de deslocamento constante de $1,0 \text{ cm min}^{-1}$, equipado com célula de carga de 200 N, haste com base de 4 mm de diâmetro e cone semiangular de 30° . Este equipamento contém receptor e interface acoplados a um computador que registra as leituras com auxílio de software específico. Os ensaios foram realizados com uma leitura por amostra ($n = 20$), e o IC de cada amostra resultou do valor médio de leituras de resistência do solo à penetração (RP) da respectiva amostra.

Na sequência, essas amostras foram submetidas ao ensaio de compressão uniaxial, utilizando um consolidômetro automático com interação homem/máquina (IHM), modelo CNTA-IHM/BR-001/07, desenvolvido por Silva et al. (2015). Os níveis de pressão aplicados ao corpo-de-prova ou amostra indeformada durante cada ensaio de compressão foram: 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa, tomando como referência a proposição de Taylor (1948), que define a deformação máxima de até 90% do corpo-de-prova, para cada nível de pressão aplicada na amostra. Posteriormente, a curva de compressão do solo foi obtida para cada tratamento, nas três camadas, plotando-se a pressão aplicada em escala logarítmica, no eixo das abscissas, e os valores de densidade do solo (D_s), no eixo das ordenadas.

A pressão de préconsolidação (σ_p) é uma estimativa da capacidade de suporte de carga do solo (CSC), e foi determinada por meio de dois métodos distintos (M_1 e M_3), propostos por Dias Junior e Pierce (1995). Em M_1 , os valores de σ_p foram estimados em corpos-de-prova, cujo o teor de água no solo ficou abaixo ou igual ao potencial matricial de 100 kPa, enquanto em M_3 , o teor de água no corpo de prova ficou acima do potencial matricial de 100 kPa. A curva de compressão do solo é composta por duas regiões distintas: a) curva de compressão secundária, que indica a região na qual a deformação é elástica ou recuperável, e b) reta de compressão virgem, uma região de deformação plástica e não recuperável. O valor estimado de σ_p separa estas duas regiões.

O impacto das práticas agrícolas e da mudança de uso da terra em sítios antropogênicos na Amazônia foi avaliado a partir dos parâmetros de compressibilidade, e se deu em duas etapas. Na primeira, foram ajustados modelos de capacidade de suporte de carga (CSC) de três camadas do horizonte antropogênico da área de referência (VN-TPA), segundo a sugestão de Dias Junior e Pierce (1995, 1996). Para esse procedimento, os corpos-de-prova (0,0635 m de diâmetro e 0,0254 m de altura) foram previamente saturadas com água em laboratório, e ajustados a cinco conteúdos de

água com quatro repetições, os quais variaram de $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ até a umidade de saturação (θ_s), simulando o comportamento do solo no campo quando submetidos condições hídricas extremas. Na camada $0,00 - 0,10 \text{ m}$, os conteúdos de água no solo variaram de $0,09$ a $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, na camada $0,10 - 0,20 \text{ m}$ foram de $0,08$ a $0,38 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, e na camada $0,20 - 0,30 \text{ m}$ variaram de $0,09$ a $0,37 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$.

A equação 2, proposta por Dias Junior et al. (2005), permitiu estimar a CSC do solo, a partir de valores de σ_p em função de diferentes e crescentes conteúdos de água no solo (θ), predefinidos para esta pesquisa:

$$\sigma_p = 10^{(a + b \times \theta)} \quad (2)$$

em que σ_p = a pressão de préconsolidação (kPa); “a” e “b” = são coeficientes da equação, e θ = o conteúdo de água no solo ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$).

A segunda etapa consistiu em avaliar a resposta de σ_p dos quatro tratamentos (tipos de uso e manejo), nas três camadas de solo, submetidos a dois graus de consistência, θ_1 (teor de água no solo dentro da região friável) e θ_2 (teor de água no solo dentro da região plástica), e compará-los com os valores de σ_p estimados pelo modelo CSC (Equação 2) para cada camada do solo do tratamento de referência VN-TPA. Os graus de consistência foram determinados, ajustando o conteúdo de água na amostra abaixo (θ_1) e acima (θ_2) do limite de plasticidade do solo (LP), que foi determinado anteriormente de acordo com Teixeira et al. (2017). Buscou-se com isso verificar o quanto cada tratamento (uso, ou manejo), em função do teor de água (consistências friável e plástica), impactou a CSC do horizonte antropogênico, isto é, a sua susceptibilidade à compactação, em relação ao modelo ajustado para o tratamento mata nativa (Fig. 12).

A comparação do impacto sobre a CSC provocado pelos diferentes tipos de uso e manejo em relação a mata nativa (VN-TPA) seguiu a sugestão de Dias Junior et al. (2005), descrito na Figura 5. Esse método consiste na divisão desses modelos em três “regiões”. Pontos na região “a” indicam que há compactação adicional do solo; na região “b”, que não ocorreu compactação adicional no solo, mas há tendência de que possa ocorrer se não for respeitada a capacidade de suporte de carga do solo definida pelo limite superior do intervalo de confiança; e na região “c”, indica ausência de compactação do solo.

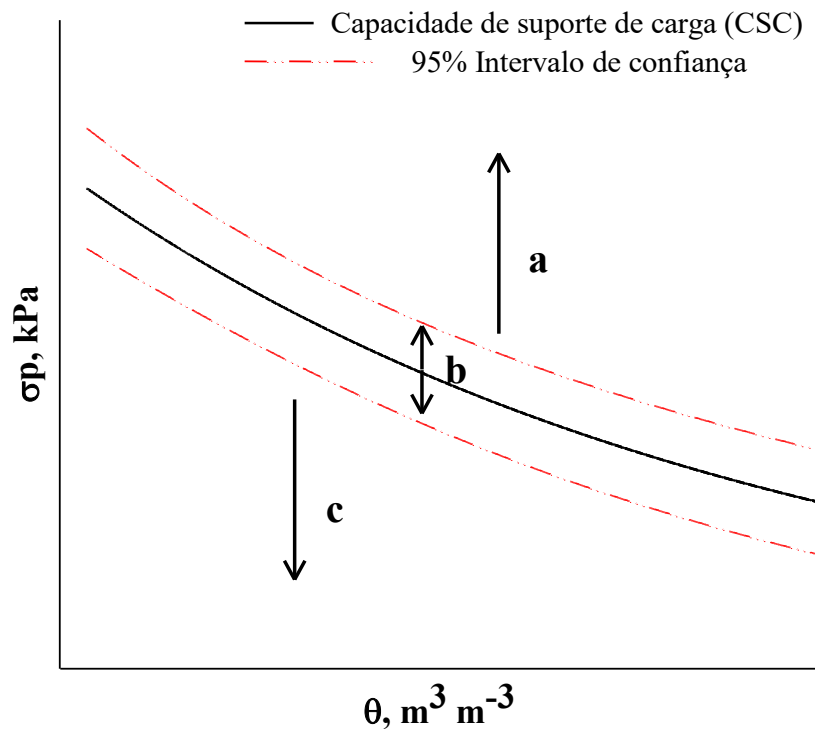


Figura 5. Modelo de capacidade de suporte de carga do solo CSC, com as três “regiões” de análise de compactação. Região “a” com compactação; “b”, sem compactação, mas com tendência a compactar; e “c”, sem compactação. Modificado de Dias Junior et al. (2005).

2.4 Análise dos dados

Os pressupostos de normalidade dos dados e homogeneidade das variâncias foram testados pelos testes Shapiro-Wilk e Levene ($p < 0,05$), respectivamente, e quando estes não foram atendidos, os dados foram transformados utilizando a função Box-Cox. Na análise univariada aplicou-se uma ANOVA a fim de compreender o efeito dos tratamentos sobre as variáveis dependentes, e quando a hipótese nula foi rejeitada pelo teste F, usou-se o teste de Tukey ($p < 0,05$). Uma matriz de correlação de Pearson foi gerada para entender as relações entre os diferentes atributos do solo, e para a análise multivariada, uma análise de componentes principais (ACP) foi desenvolvida para aproximar a natureza dos dados. Todos os procedimentos estatísticos foram desenvolvidos pelo software R, versão 4.3.3 (R Core Team, 2023), com auxílio dos pacotes tidyverse (Wickham et al., 2019), MASS (Venables et al., 2002), ExpDes.pt (Ferreira et al., 2021), FactorMineR (Sebastian et al., 2008), factoextra (Kasambara e Mundt, 2020), e metan (Olivoto e Lúcio, 2020).

O modelo e equações ajustadas para a capacidade de suporte de carga (CSC) da área de referência (VN-TPA) foram sistematizados de acordo com a sugestão de Dias Junior et al. (2005), e obtidos a partir do software SigmaPlot 11,0 (SystatSoftware inc., 2007). As equações obtidas na avaliação da resistência ao cisalhamento, bem como aquelas de acordo com o modelo de capacidade de carga, foram comparadas pelo procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989), utilizando o teste de homogeneidade de modelos lineares. Os testes de homogeneidade para modelos lineares comparam primeiramente as variâncias residuais dos dois modelos e, se essas variâncias forem homogêneas pelo teste F, então os coeficientes, linear (a) e angular (b) são comparados.

3 RESULTADOS

3.1 Efeito das práticas e manejo dos solos antropogênicos sobre os atributos físicos e carbono do solo

Na Tabela 1 está apresentada a distribuição granulométrica das partículas do solo, para as três camadas das áreas avaliadas. De modo geral, a fração areia foi predominante em todos os tratamentos, exceto nos tratamentos VN-TPA e CC-TM na camada de 0,10 – 0,20 m, e em VN-TPA, PC-TPA e CC-TM na camada de 0,20 – 0,30 m, nas quais se observou um ligeiro acúmulo da fração argila. Os maiores teores de areia foram observados nos tratamentos PC-TPA e QA-TPA na camada superficial do solo (0,00 – 0,10 m), com 516 e 503 g kg⁻¹ respectivamente. Por outro lado, a fração argila aumentou com a profundidade, sendo que as maiores quantidades desta partícula foram encontradas nos tratamentos CC-TM (527 g kg⁻¹) e PC-TPA (492 g kg⁻¹), na camada 0,20 – 0,30 m, com incrementos de 83 e 64% quando comparado aos valores da camada 0,00 – 0,10 m.

Os maiores teores de silte foram observados no tratamento CC-TPA em todas as camadas, com 327, 326 e 297 g kg⁻¹ da fração silte nas camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, respectivamente. Em suma, a textura dos solos antropogênicos deste estudo, variou de argilo-arenosa, franco-argilosa e argilosa (USDA, 2017).

Os maiores valores de densidade das partículas do solo (D_p) também foram quantificados em todas as camadas do tratamento PC-TPA (Tab. 1). Na camada 0,00 – 0,10 m, apenas os tratamentos QA-TPA ($2,22 \text{ Mg m}^{-3}$) e CC-TPA ($2,25 \text{ Mg m}^{-3}$) mostraram valores significativamente menores quando comparado ao tratamento PC-TPA ($2,38 \text{ Mg m}^{-3}$). Na camada 0,10 – 0,20 m, as médias dos tratamentos PC-TPA e QA-TPA, 2,49 e $2,46 \text{ Mg m}^{-3}$, foram significativamente maiores que os demais tratamentos, e na camada 0,20 – 0,30 m, o menor valor de D_p foi quantificado no tratamento VN-TPA ($2,22 \text{ Mg m}^{-3}$; $p < 0,05$), sendo inferior a todos os tratamentos, exceto ao tratamento CC-TPA ($2,30 \text{ Mg m}^{-3}$) (Tab. 1).

Tabela 1. Valores médios dos atributos físicos e carbono orgânico total de solos antropogênicos, sob diferentes usos da terra em Manacapuru, Amazonas, Brasil.

Variáveis	Camadas (m)	Tratamentos				
		VN-TPA	QA-TPA	CC-TPA	PC-TPA	CC-TM
Argila, g kg^{-1}	0,00-0,10	346,2	317,5	253,8	301,2	287,5
	0,10-0,20	421,3	377,5	288,8	440,0	453,8
	0,20-0,30	427,5	420,0	322,5	492,5	527,5
Silte, g kg^{-1}	0,00-0,10	209,0	179,2	327,5	182,3	262,5
	0,10-0,20	223,9	164,5	326,6	101,9	156,8
	0,20-0,30	204,4	139,5	297,1	95,9	131,3
Areia, g kg^{-1}	0,00-0,10	444,8	503,3	418,8	516,5	450,0
	0,10-0,20	354,9	458,0	384,7	458,1	389,4
	0,20-0,30	368,1	440,5	380,4	411,6	341,2
D_p , Mg m^{-3}	0,00-0,10	2,30 ab	2,22 b	2,25 b	2,38 a	2,30 ab
	0,10-0,20	2,27 b	2,46 a	2,34 b	2,49 a	2,32 b
	0,20-0,30	2,22 b	2,39 a	2,30 ab	2,41 a	2,37 a
D_s , Mg m^{-3}	0,00-0,10	1,20 d	1,35 b	1,40 a	1,38 ab	1,24 c
	0,10-0,20	1,31 cd	1,31 d	1,35 b	1,42 a	1,34 bc
	0,20-0,30	1,35 b	1,34 c	1,38 b	1,46 a	1,27 d
PT, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$	0,00-0,10	0,47 a	0,39 d	0,38 d	0,42 c	0,46 b
	0,10-0,20	0,42 b	0,47 a	0,42 b	0,43 b	0,42 b
	0,20-0,30	0,39 c	0,44 b	0,40 c	0,39 c	0,46 a

	0,00-0,10	28,0 b	30,3 a	26,6 c	19,6 d	28,5 b
COT, g kg ⁻¹	0,10-0,20	31,9 a	19,7 d	25,3 b	15,7 e	23,2 c
	0,20-0,30	22,7 a	16,5 d	19,5 b	13,9 e	18,8 c

Argila, Silte e Areia; Dp = densidade das partículas do solo; COT = carbono orgânico do solo. n = 5. Ds = densidade do solo; PT = porosidade total. n = 20. Resultados seguidos de letras iguais não apresentam diferença significativa, enquanto letras diferentes indicam diferença estatística pelo teste Tukey $p < 0,05$.

A densidade do solo (Ds) nos horizontes antropogênicos foi alterada pela ação do uso e manejo nas três camadas avaliadas (Tab. 1). A substituição da vegetação e a mudança no uso da terra de áreas nativas para agrossistemas, aumentou a Ds no horizonte antropogênico. Os quintais agroflorestais que constituem um tipo de sistema agroflorestal (SAF) em pequenas áreas na Amazônia Central, foi o tratamento que menos impactou à Ds, se aproximando dos valores da floresta nativa. As maiores Ds foram observadas no tratamento CC-TPA (1,40 Mg m⁻³; $p < 0,001$) na camada 0,00 – 0,10 m, e PC-TPA (1,42 e 1,46 Mg m⁻³; $p < 0,001$), nas camadas 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, respectivamente (Tab. 1).

Todos os tratamentos apresentaram valores médios de Ds maiores do que VN-TPA (1,20 Mg m⁻³; $p < 0,001$), na camada 0,00 – 0,10 m. Na camada 0,10 – 0,20 m, os tratamentos PC-TPA e CC-TPA (1,42 e 1,35 Mg m⁻³; $p < 0,001$, respectivamente) foram estatisticamente superiores a VN-TPA (1,31 Mg m⁻³), com um ligeiro aumento de aproximadamente 8 e 3% da Ds, respectivamente. Apenas o maior valor observado no tratamento PC-TPA (1,46 Mg m⁻³; $p < 0,05$) foi considerado um incremento significativo quando comparado a VN-TPA (1,31 Mg m⁻³), na camada 0,20 – 0,30 m. Vale destacar que apesar das práticas convencionais de preparo do solo que caracterizam o manejo no tratamento CC-TM, somente na camada 0,00 – 0,10 m, notou-se um aumento significativo da Ds nesse tratamento, quando comparado com VN-TPA. Na camada 0,10 – 0,20 m não houve diferenças significativas, e na camada 0,20 – 0,30 m, ocorreu uma redução da Ds em CC-TM (1,27 Mg m⁻³) quando foi comparado com VN-TPA (1,35 Mg m⁻³) (Tab. 1).

A porosidade total do solo (PT) apresentou diferenças significativas entre os usos sobre os horizontes antropogênicos (Tab. 1). A maior porosidade total foi encontrada no tratamento VN-TPA (0,47 m³ m⁻³) na camada superficial do solo (0,00 – 0,10 m), enquanto na camada 0,10 – 0,20 m o maior valor foi quantificado no tratamento QA-TPA (0,47 m³ m⁻³), seguido de CC-TM (0,46 m³ m⁻³) na camada 0,20 – 0,30 m. Assim, na camada 0,00 – 0,10 m, os valores obtidos para porosidade total permite

ordenar a seguinte sequência entre os tratamentos: VN-TPA > CC-TM > PC-TPA > QA-TPA = CC-TPA; $p < 0,05$, enquanto o comportamento dessa variável nas camadas 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m foi na ordem de: (QA-TPA > PC-TPA > VN-TPA = CC-TPA = CC-TM; $p < 0,05$); (CC-TM > QA-TPA > CC-TPA = VN-TPA = PC-TPA; $p < 0,05$), respectivamente.

Os maiores conteúdos de carbono orgânico total (COT) foram quantificados no tratamento com floresta nativa (VN-TPA), exceto na camada 0,00 – 0,10 m, na qual o teor de COT em QA-TPA ($30,3 \text{ g kg}^{-1}$; $p < 0,01$) foi estatisticamente superior aos observados nos demais tratamentos (Tab. 1). Além disso, o efeito mais significativo foi constatado no uso do solo com pomar de citros (PC-TPA), que promoveu as maiores reduções de carbono no solo, com perdas de COT que alcançaram 70, 49 e 61% quando comparado com VN-TPA, nas camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, respectivamente. Embora a diversidade de árvores, arbustos em consorciação com culturas agrícolas presentes no quintal agroflorestal (QA-TPA) se aproxime da composição florestal de VN-TPA, apenas na camada de 0,00 – 0,10 m o tratamento QA-TPA ($30,3 \text{ g kg}^{-1}$; $p < 0,05$) foi superior a VN-TPA (28 g kg^{-1}), com reduções significativas nas camadas de 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m (Tab. 1).

3.2. Efeito da mudança no uso da terra em solos antropogênicos sobre a qualidade ou comportamento dos atributos mecânicos do solo

Diferenças significativas entre os tratamentos foram observadas quando se avaliou em resposta aos atributos mecânicos do solo, principalmente em função dos diferentes graus de consistência do solo (θ_1 e θ_2). Os tratamentos também impactaram significativamente no limite de plasticidade do solo (LP) (Fig. 6), e na resistência do solo ao cisalhamento (RC) (Fig. 7).

Na camada 0,00 – 0,10 m os maiores valores de LP em CC-TPA, QA-TPA e CC-TM ($0,30$, $0,29$ e $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$; $p < 0,01$), foram estatisticamente diferentes dos encontrados nos tratamentos VN-TPA e PC-TPA, sendo que estes últimos, com valores médios de $0,26$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, não apresentaram diferenças entre si (Fig. 6). Por outro lado, na camada 0,10 – 0,20 m, uma redução significativa de LP foi observada no tratamento QA-TPA quando comparado aos demais, enquanto os maiores valores foram encontrados nos tratamentos CC-TPA ($0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e VN-TPA ($0,28 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). Na camada 0,20 – 0,30 m, todos os tratamentos apresentaram

diferenças entre si, para o LP. A resposta dos tratamentos para este atributo permitiu a seguinte sequência: CC-TPA > CC-TM > VN-TPA > PC-TPA > QA-TPA; $p < 0,001$ (Fig. 6).

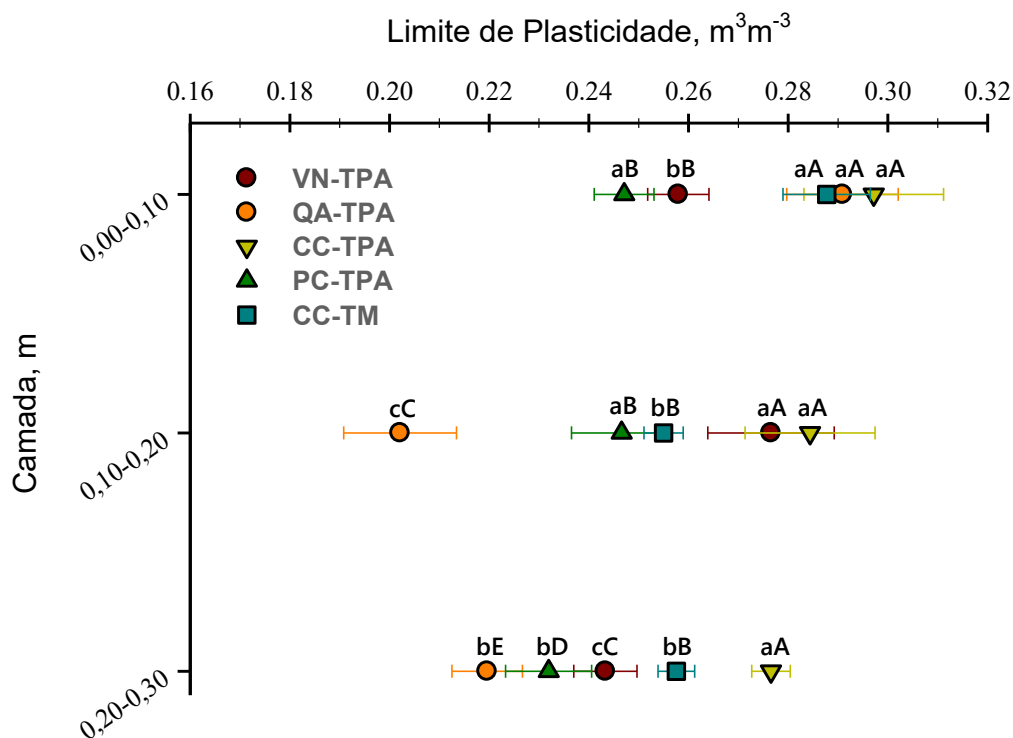


Figura 6. Valor médio do limite de plasticidade em solos antropogênicos sob diferentes usos e manejos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil. A comparação horizontal entre os tratamentos é representada por letras maiúsculas, enquanto letras minúsculas indicam a comparação vertical, entre as camadas no mesmo tratamento. Letras iguais exibem a não-significância, enquanto letras diferentes indicam diferenças significativas pelo testes de Tukey ($p < 0,05$). $n = 5$.

As envoltórias de resistência do solo ao cisalhamento (RC) para cada tratamento são apresentadas na Figura 7. Elas ilustram a resistência do solo à ruptura em função das cargas e esforços aplicados, representando um comportamento mecânico dinâmico diretamente relacionado à sua função estrutural. O conteúdo de água no solo (θ , $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no momento da avaliação em campo, variou entre os tratamentos, com valores de 0,26, 0,29, 0,31, 0,32 e 0,36 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ para PC-TPA, CC-TM, QA-TPA, VN-TPA e CC-TPA, respectivamente (Fig. 4).

A análise gráfica das envoltórias (Fig. 7) revela comportamentos distintos entre os tratamentos, evidenciando a seguinte ordem decrescente de resistência ao

cisalhamento: PC-TPA > QA-TPA > CC-TPA > VN-TPA > CC-TM. Esses resultados destacam a importância da avaliação da RC em estudos sobre a qualidade físico-mecânica de solos antropogênicos, uma vez que o uso e manejo do solo combinado com a umidade, influenciou significativamente a resistência à ruptura dos Antrossolos avaliados.

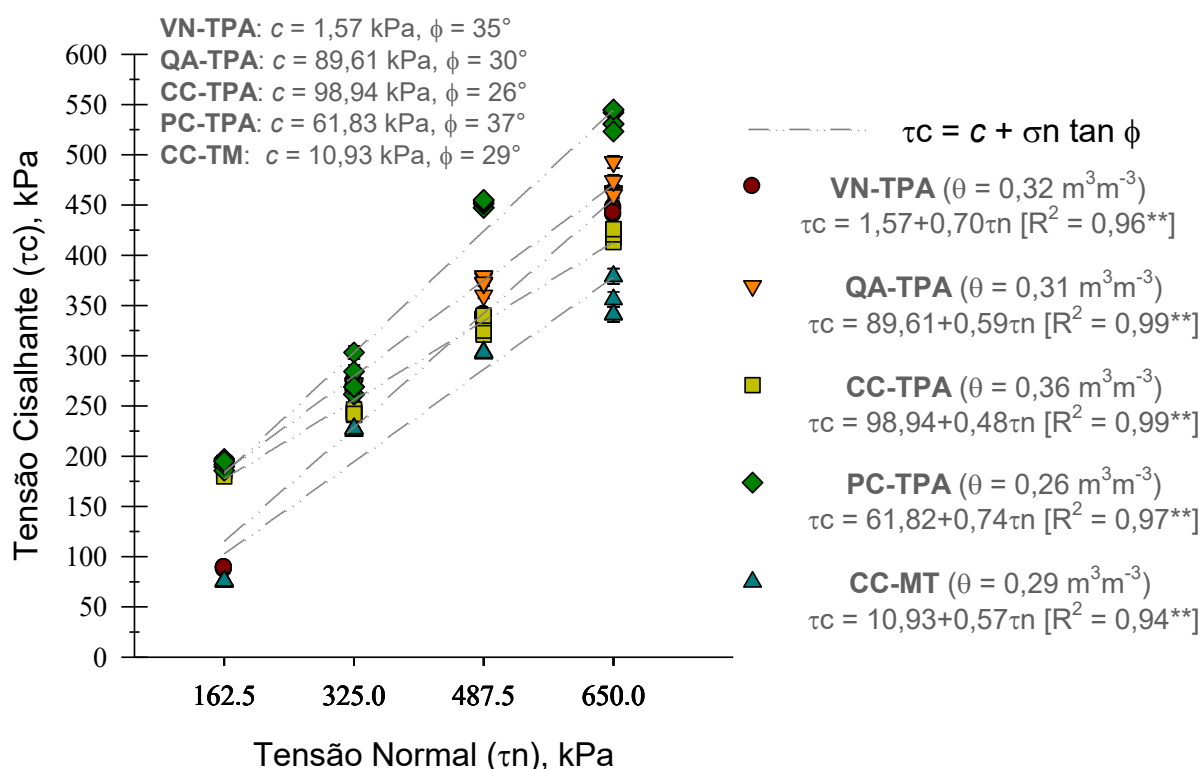


Figura 7. Envoltórias de resistência ao cisalhamento e seus respectivos valores de coesão aparente (c , kPa) e ângulo de atrito interno (ϕ , °) da camada superficial (0,00 – 0,05 m) de Antrossolos da Amazônia sob diferentes usos e manejo. $n = 6$.

Com base nas envoltórias obtidas, foram estimados os parâmetros dinâmicos do solo (Tab. 2A). As práticas de uso e manejo dos solos antropogênicos impactaram diretamente a coesão aparente do solo (c) e o ângulo de atrito interno (ϕ). Os menores valores de c foram observados nos tratamentos VN-TPA (1,57) e CC-TM (10,93), o que resultou em menor RC nesses tratamentos. Em contraste, os valores de c nos tratamentos PC-TPA, QA-TPA e CC-TPA foram expressivamente superiores, refletindo maior resistência ao cisalhamento. Além disso, os maiores valores do ϕ foram encontrados nos tratamentos PC-TPA (37°) e VN-TPA (35°), seguido de QA-TPA (30°), CC-TM (29°) e CC-TPA (26°) (Tab. 2A).

Tabela 2. A) Equações ajustadas para envoltórias de Coulomb e os respectivos valores de coesão aparente (c , kPa) e ângulo de atrito interno do solo (ϕ , °). B) Teste de significância segundo Snedecor e Cochran (1989), entre as envoltórias de Coulomb e seus respectivos parâmetros obtidos em sistemas de uso e manejo sobre Antrossolos da Amazônia.

A) Parâmetros do modelo					
Tratamentos	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente angular (b)	R ²	Coesão do solo (c)	Ângulo de atrito (ϕ)
NV-TPA	1,57	0,70	0,96**	1,57	35
QA-TPA	89,61	0,59	0,99**	89,61	30
CC-TPA	98,94	0,48	0,99**	98,94	26
PC-TPA	61,83	0,74	0,97**	61,83	37
CC-TM	10,93	0,57	0,94**	10,93	29

B) Comparação das envoltórias de Coulomb			
Tratamentos	HV (p - valor)	Coeficiente Linear (a)	Coeficiente angular (b)
NV-TPA vs QA-TPA	0,00004***	0,0000001***	0,001**
NV-TPA vs CC-TPA	0,00004***	0,23655ns	3,4e-08***
NV-TPA vs PC-TPA	0,29291ns	5,3e-14***	0,27537ns
NV-TPA vs CC-TM	0,42136ns	4,0e-06***	0,00341**
QA-TPA vs CC-TPA	0,48390ns	8,0e-10***	4,1e-07***
QA-TPA vs PC-TPA	0,00024***	2,7e-06***	2,5e-06***
QA-TPA vs CC-TM	1,8e-05***	0,0000001***	0,44898ns
CC-TPA vs PC-TPA	0,00027***	7,0e-10***	2,3e-11***
CC-TPA vs CC-TM	2,1e-05***	5,4e-11***	0,01873*
PC-TPA vs CC-TM	0,22892ns	0,0000001***	8,2e-05***

HV = analisa a homogeneidade das variâncias entre os modelos; ns = não significativo; * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.

Com o objetivo de comparar e distinguir os modelos (envoltórias) de cada equação ajustada e seus respectivos parâmetros dinâmicos (c e ϕ), que descrevem o comportamento da RC nos diferentes tipos de uso, foi aplicado o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989). Esse procedimento testa a homogeneidade das variâncias entre os conjuntos de dados dos diferentes tratamentos (Tabela 6B). A análise estatística permite avaliar se a envoltória e seus respectivos parâmetros (c e ϕ) apresentam diferenças estatisticamente significativas. Caso o teste indique significância, a RC deve ser descrita e estimada por equações distintas. Caso contrário, recomenda-se a junção dos modelos para uma melhor estimativa da RC.

Na Tabela 2B são apresentados os resultados das comparações entre os modelos, obtidos a partir do procedimento de Snedecor e Cochran (1989). Essas comparações foram organizadas considerando todas as combinações entre os tratamentos (VN-TPA, QA-TPA, CC-TPA, PC-TPA e CC-TM). Os resultados indicam que, para este estudo, a variável RC deve ser estimada por equações distintas, uma vez que houve diferenças significativas na comparação entre todos os modelos. Isso reforça que o tipo de uso e manejo é um fator determinante no comportamento da RC nesses solos antropogênicos (Tabela 2B).

3.3. Avaliação dos atributos mecânicos na zona friável dos solos antropogênicos

Sob a condição de friabilidade do solo, ou teor de água abaixo de θ_1 , os maiores valores de índice de cone (IC) foram encontrados nos tratamentos CC-TPA e PC-TPA, nas três camadas. Esses mesmos tratamentos não apresentaram diferenças entre si e foram significativamente superiores aos demais tratamentos em todas as camadas avaliadas (Tab. 3). Os tratamentos VN-TPA, QA-TPA e CC-TM não exibiram diferenças estatísticas, exceto na camada 0,10 – 0,20 m, na qual se observou uma redução significativa ($p < 0,05$) de 4 MPa no tratamento CC-TM (11 MPa), comparativamente ao tratamento VN-TPA (15,3 MPa) (Tab. 3).

Nas áreas sem práticas agrícolas (VN-TPA e QA-TPA), a menor resistência mecânica do solo foi observada na camada superficial de 0,00 – 0,10 m, com aumento significativo em profundidade. Por outro lado, nos tratamentos em que houve alteração permanente da cobertura vegetal (PC-TPA), sobretudo aqueles com práticas

convencionais de preparo do solo (CC-TPA e CC-TM), não se observou impacto significativo do IC em profundidade.

Ainda na condição de friabilidade (θ_1), os maiores valores de pressão de préconsolidação (σ_p) foram atribuídos ao impacto dos tratamentos com plantios agrícolas, CC-TPA, PC-TPA e CC-TM (Tab. 3). Desse modo, é possível inferir que os incrementos de σ_p em solos antropogênicos, estão relacionados à mudança de uso da terra, que é caracterizada pela conversão de floresta nativa amazônica para sistemas convencionais de uso agrícola.

É possível evidenciar, numericamente, o efeito dos manejos agrícolas sobre o aumento da σ_p nessas áreas (Tab. 3). Observou-se também, que a camada mais superficial (0,00 – 0,10 m) apresentou maior suscetibilidade às alterações, uma vez que apenas nesta camada todos os tratamentos apresentaram maiores valores (significativos) de σ_p quando comparado ao tratamento VN-TPA (398 kPa; $p < 0,001$).

As maiores médias de σ_p na camada 0,10 – 0,20 m foram atribuídas aos tratamentos CC-TPA, CC-TM e PC-TPA, com 531, 501 e 492 kPa, respectivamente. No entanto, somente CC-TPA (531 kPa; $p < 0,05$) apresentou diferença significativa, com um incremento de 21,5% da σ_p em relação a VN-TPA (437 kPa). Vale destacar que na camada 0,20 – 0,30 m os tratamentos não foram estatisticamente diferentes, isto é, nessa condição de umidade (θ_1), o estudo comparativo das médias de σ_p não permitiu quantificar um provável impacto da mudança de uso da terra.

O índice de compressão do solo (m) foi explorado nesta pesquisa como um indicador da susceptibilidade do solo antropogênico à compactação, a exemplo das mesmas condições impostas para IC e σ_p .

Os maiores índices de compressão (m), e, portanto, maior suscetibilidade à compactação, foram atribuídos aos tratamentos sem revolvimento do solo, VN-TPA e QA-TPA, em todas as camadas (Tab. 3). Não obstante, quando se comparou ao tratamento com floresta, o m decresceu significativamente em todas as camadas do tratamento CC-TPA. Na camada 0,00 – 0,10 m, ao comparar com VN-TPA (0,29), também se observou redução do m em todos tratamentos, exceto em QA-TPA (0,25).

Na camada 0,10 – 0,20 m, o menor valor foi observado em CC-TPA (0,15), que diferiu significativamente de todos os demais tratamentos (Tab. 3). Por fim, na camada 0,20 – 0,30 m, os tratamentos CC-TPA (0,14) e PC-TPA (0,15) promoveram redução significativa de m , indicando maior resistência mecânica e, portanto, menor

suscetibilidade à compactação. Os tratamentos VN-TPA, QA-TPA e CC-TM não apresentaram diferenças significativas, com relação ao índice de compressão do solo (m) (Tab. 3).

3.4. Avaliação dos atributos mecânicos na zona plástica dos solos antropogênicos

Quando se analisou o IC no solo sob o conteúdo de água acima do LP, ou seja, na região plástica (θ_2), observou-se um comportamento oposto ao apresentado no solo em θ_1 (Tab. 3). Os maiores valores de IC foram observados em todas as camadas de VN-TPA, enquanto os menores valores foram quantificados nos tratamentos com uso convencional do solo: em CC-TM na camada 0,00 – 0,10 m, e em CC-TPA nas camadas 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, com valores de 1,3, 2,0 e 2,2 MPa, respectivamente (Tab. 3).

Na camada 0,00 – 0,10 m, com exceção de CC-TPA (2,6 MPa), os demais tratamentos tiveram redução significativa de IC quando comparados com VN-TPA (Tab. 3). Na camada 0,10 – 0,20 m, somente os valores encontrados em CC-TPA (2,0 MPa) e em PC-TPA (2,4 MPa) foram estatisticamente menores ($p < 0,05$) que os observados em VN-TPA (6,1 MPa). Por outro lado, na camada 0,20 – 0,30 m, o valor médio quantificado no tratamento VN-TPA (12 MPa; $p < 0,001$), foi estatisticamente superior a todos os tratamentos (Tab. 3).

Tabela 3. Atributos mecânicos do solo sob dois conteúdos de água do solo [θ_1 , θ_2], em solos antropogênicos do município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.

Variáveis	Camadas (m)	TRATAMENTOS									
		VN-TPA	QA-TPA	CC-TPA	PC-TPA	CC-TM	VN-TPA	QA-TPA	CC-TPA	PC-TPA	CC-TM
		θ_1					θ_2				
IC, MPa	0,00-0,10	8,4 bB	10,3 bB	19,9 aA	17,8 aA	12,4 aB	3,6 bA	1,6 bB	2,5 aAB	1,5 cB	1,3 bB
	0,10-0,20	15,2 aB	13,5 aBC	19,5 aA	22,1 aA	10,9 aC	6,1 abA	4,6 aAB	1,9 aB	2,4 bB	4,0 aAB
	0,20-0,30	14,6 aB	14,7 aB	22,2 aA	22,2 aA	13,4 aB	12,4 aA	3,8 aB	2,2 aB	3,3 aB	4,5 aB
σ_p , kPa	0,00-0,10	398 aB	496 aA	462 bA	509 aA	508 aA	240 aA	185 bA	211 aA	184 cA	227 bA
	0,10-0,20	437 aB	458 aB	531 aA	492 aAB	501 aAB	282 aA	304 aA	204 aB	268 bA	284 aA
	0,20-0,30	472 aA	527 aA	548 aA	481 aA	483 aA	298 aA	200 bB	209 aB	322 aA	332 aA
m	0,00-0,10	0,29 aA	0,25 aAB	0,24 aBC	0,20 aC	0,23 aBC	0,39 aA	0,36 aAB	0,29 aC	0,33 aB	0,36 aAB
	0,10-0,20	0,20 bA	0,21 bA	0,15 bB	0,22 aA	0,20 bA	0,33 abBC	0,39 aA	0,29 aC	0,31 abC	0,37 aAB
	0,20-0,30	0,18 bA	0,19 cA	0,14 bB	0,15 bB	0,19 bA	0,28 bB	0,32 bB	0,27 bB	0,28 bB	0,39 aA

θ_1 = umidade na consistência friável; θ_2 = umidade na região plástica; IC = índice de cone; σ_p = pressão de préconsolidação; m = índice de compressão do solo. Letras maiúsculas representam a comparação entre os tratamentos na horizontal, e letras minúsculas exibem o resultado do efeito nas camadas do solo em cada tratamento, ambos pelo teste Tukey ($p < 0,05$). As letras diferentes demonstram diferenças significativas, e letras iguais a ausência de diferenças. $n = 10$.

Com base no estudo comparativo das médias de σ_p ($n = 10$) na umidade que confere a zona de plasticidade do solo (θ_2), nas três camadas para todos os tratamentos, apenas três alterações significativas foram observadas, demonstrando a baixa variabilidade desse atributo sob a condição de solo mais úmido (Tab. 3).

Não se observou diferenças significativas entre os tratamentos na camada superficial do solo (0,00 – 0,10 m), enquanto que, na camada 0,10 – 0,20 m, observou-se um decréscimo pelo menor valor da σ_p encontrado em CC-TPA (204 kPa; $p < 0,05$). Por outro lado, na camada 0,20 – 0,30 m, as reduções significativas ($p < 0,001$) foram constatadas em QA-TPA (200 kPa) e CC-TPA (209 kPa), com decréscimos de 33 e 30% da σ_p , respectivamente, quando comparados ao tratamento VN-TPA (298 kPa; $p < 0,05$). O aumento da umidade de θ_1 para θ_2 provocou reduções de aproximadamente 50% na pressão de préconsolidação, nas três camadas dos solos deste estudo (Tab. 3).

Esse aumento no conteúdo de água também afetou no incremento do índice de compressão (m), ou seja, independente do tratamento e camada avaliada, todas as médias estão acima de 0,25 (Tab. 3). O solo no tratamento CC-TPA apresentou os menores valores de m em todas as camadas, enquanto os maiores valores de m foram observados em VN-TPA (0,39) na camada 0,00 – 0,10 m, QA-TPA (0,39) na camada 0,10 – 0,20 m, e CC-TM (0,39) na camada 0,20 – 0,30 m (Tab. 3).

Na camada 0,00 – 0,10 m, os maiores m foram observados nos tratamentos VN-TPA, QA-TPA e CC-TM, com 0,39, 0,36 e 0,36, respectivamente. A menor média de m foi observada em CC-TPA (0,29) seguido de PC-TPA (0,33), ambos significativamente diferentes de VN-TPA (Tab. 3). Na camada 0,10 – 0,20 m, a maior diferença foi observada nos baixos valores encontrados em CC-TPA (0,29) e PC-TPA (0,31). E na camada 0,20 – 0,30 m, as médias não apresentaram diferenças significativas, exceto em CC-TM (0,39; $p < 0,001$) que foi estatisticamente superior aos demais tratamentos (Tab. 3).

3.5 Efeito da umidade e do manejo na curva de compressão do solo

De acordo com Kondo e Dias Junior (1999a), a curva de compressão do solo consiste de duas regiões: uma região de deformações pequenas, elásticas e recuperáveis, denominada de curva de compressão secundária, e uma de deformações plásticas e não-recuperáveis, chamada de reta de compressão virgem, em que a

compactação adicional ocorre no solo. O ponto que divide essas duas regiões na curva de compressão do solo chama-se pressão de préconsolidação (σ_p).

Na Figura 8, são apresentadas as curvas de compressão do tratamento referência (VN-TPA) em função de cinco umidades para as três camadas de solo. A umidade do solo foi o principal fator regulador do comportamento compressivo, representado na Figura 8 pelo ajuste exponencial entre D_s e σ_p (linha tracejada).

O ponto de inflexão da curva que indica a σ_p , foi diretamente afetado pelo incremento da umidade, isto é, quanto mais úmido o solo, menor o valor de σ_p e, quanto mais seco, maior o valor de σ_p , e consequentemente, a capacidade de suporte de carga do solo, nas três camadas estudadas. A correlação entre os atributos σ_p e θ foi negativa e altamente significativa ($r = -0,83$; $p < 0,001$).

Ao analisar a resposta da pressão de préconsolidação (σ_p) em função das umidades extremas do modelo, solo na condição tenaz ($\pm 0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e de saturação ($\pm 0,39 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) das três camadas, os valores médios obtidos foram de 487 e 179 kPa, respectivamente. Esses resultados demonstraram suscetibilidade da capacidade de suporte de carga do solo em VN-TPA, especialmente quando o conteúdo de água no solo avança na região plástica, independentemente da profundidade do horizonte antrópico sob a mata nativa.

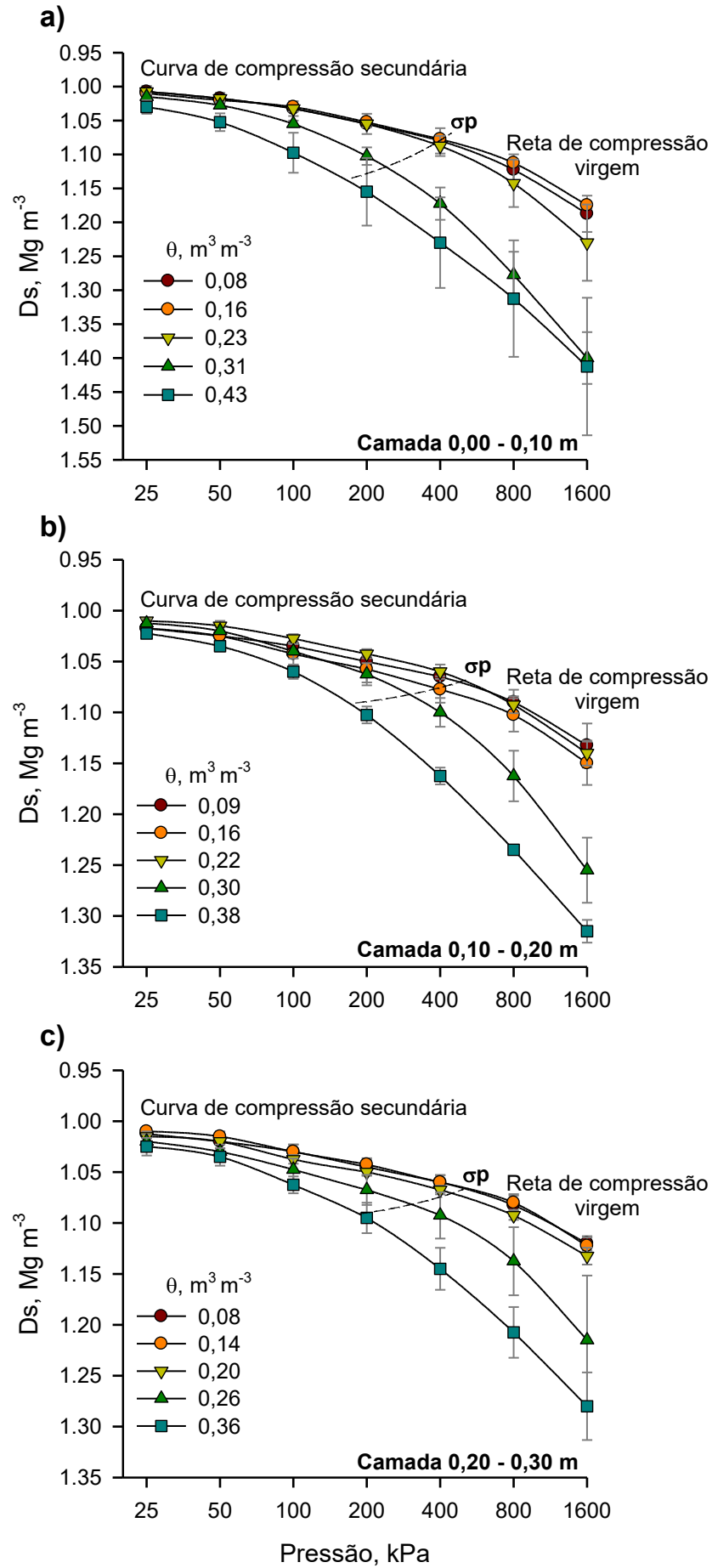


Figura 8. Curva de compressão de um solo antropogênico com floresta nativa sob conteúdos crescentes de água. Pressão = logaritmo das pressões aplicadas no ensaio de compressão uniaxial; D_s = média da densidade do solo em cada pressão aplicada; σ_p = média da pressão de préconsolidação; θ = valores médios da umidade volumétrica. $n = 4$.

Nas figuras 9, 10 e 11, estão apresentadas as curvas de compressão geradas para os tratamentos QA-TPA, CC-TPA, PC-TPA e CC-TM, sob dois estados de consistência do solo, abaixo do limite de plasticidade (LP) e, portanto, na região friável (θ_1) e acima LP, região plástica (θ_2), para as camadas 0,00 – 0,10 m (Fig. 9), 0,10 – 0,20 m (Fig. 10), e 0,20 – 0,30 m (Fig. 11).

O comportamento compressivo do solo em todos os tratamentos das respectivas camadas, a exemplo do observado no tratamento de referência (Fig. 8), reitera o papel controlador da água, isto é, há o aumento da densidade do solo (D_s), e consequente redução da σ_p em função da elevação da umidade. Entretanto, observa-se, que o incremento de compressibilidade variou em função de cada tratamento e da camada de solo, reforçando o papel da história de tensão que é decorrente do impacto de cada manejo.

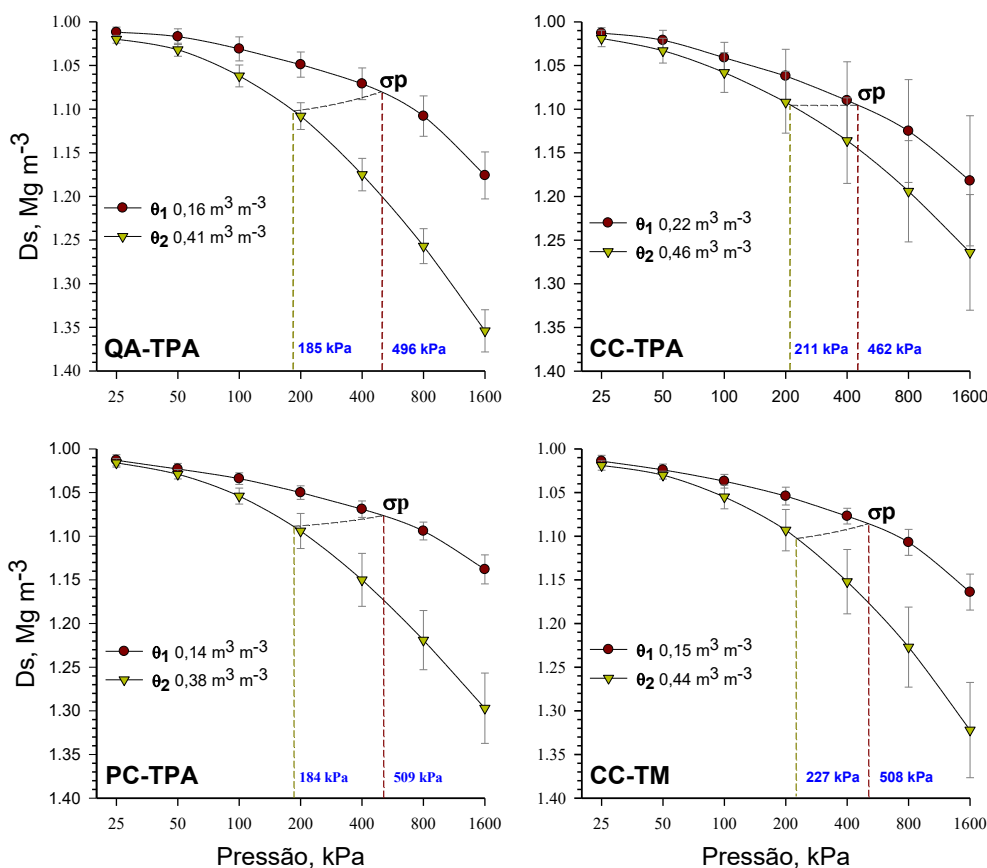


Figura 9. Curva de compressão na camada 0,00 – 0,10 m de solos antropogênicos sob diferentes usos da terra. σ_p = média da pressão de préconsolidação; θ_1 = valores médios da umidade volumétrica abaixo do limite de plasticidade; θ_2 = valores médios da umidade volumétrica acima do limite de plasticidade; Pressão = logaritmo das pressões aplicadas no ensaio de compressão uniaxial; D_s = média da densidade do solo em cada pressão aplicada. QA-TPA = quintal agroflorestal em terra preta; CC-TPA = preparo convencional em terra preta; PC-TPA = monocultivo de laranja em terra preta; CC-TM = preparo convencional em terra mulata. $n = 10$.

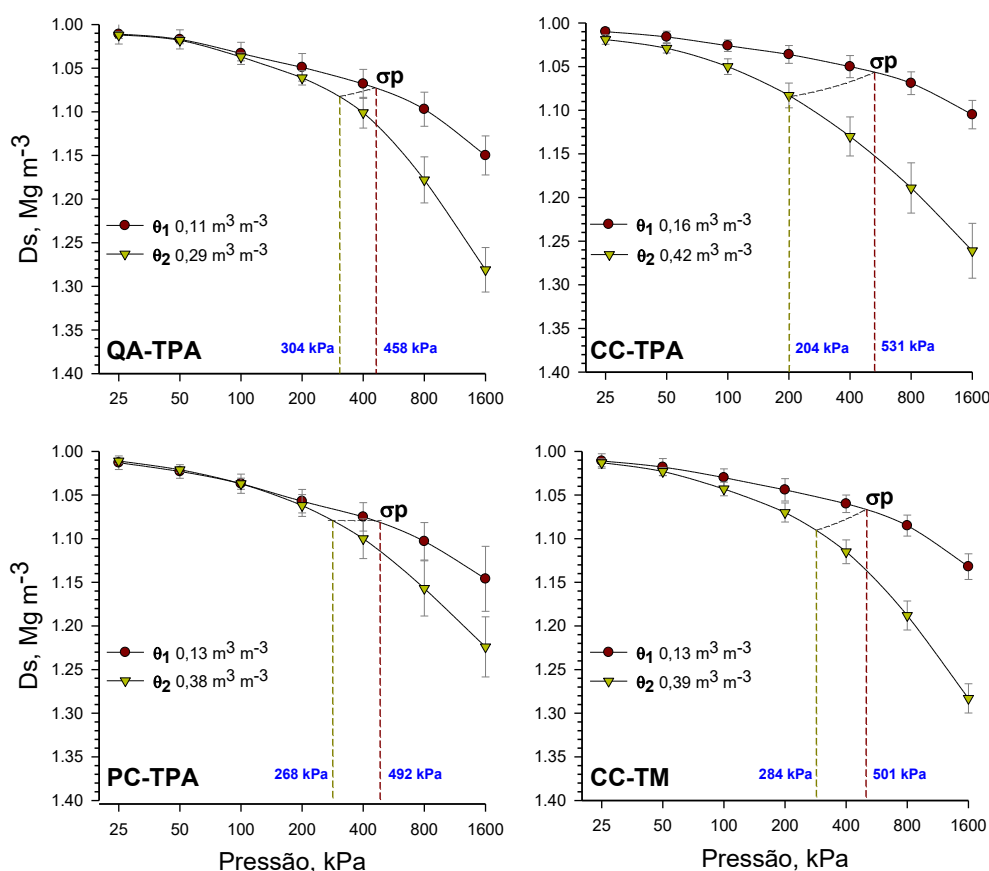


Figura 10. Curva de compressão na camada 0,10 – 0,20 m de solos antropogênicos sob diferentes usos da terra. σ_p = média da pressão de préconsolidação; θ_1 = valores médios da umidade volumétrica abaixo do limite de plasticidade; θ_2 = valores médios da umidade volumétrica acima do limite de plasticidade; Pressão = logaritmo das pressões aplicadas no ensaio de compressão uniaxial; D_s = média da densidade do solo em cada pressão aplicada. QA-TPA = quintal agroflorestal em terra preta; CC-TPA = preparo convencional em terra preta; PC-TPA = monocultivo de laranja em terra preta; CC-TM = preparo convencional em terra mulata. $n = 10$.

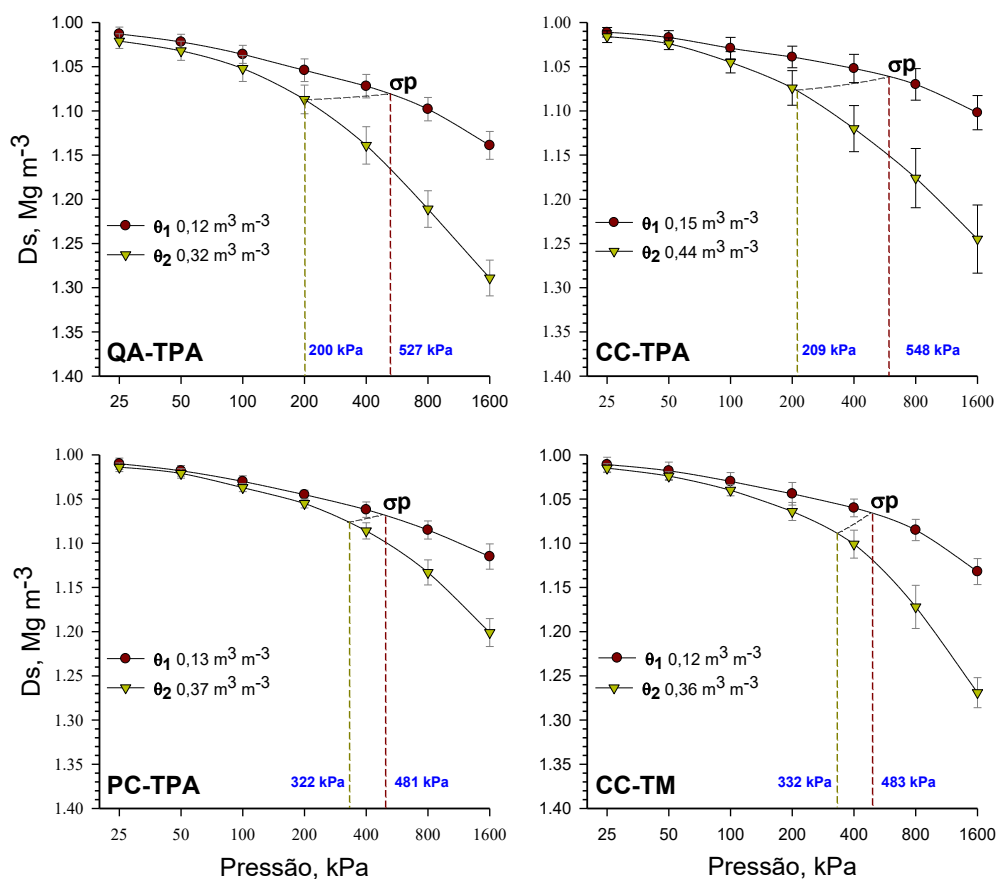


Figura 11. Curva de compressão na camada 0,20 – 0,30 m de solos antropogênicos sob diferentes usos da terra. σ_p = média da pressão de préconsolidação; θ_1 = valores médios da umidade volumétrica abaixo do limite de plasticidade; θ_2 = valores médios da umidade volumétrica acima do limite de plasticidade; Pressão = logaritmo das pressões aplicadas no ensaio de compressão uniaxial; D_s = média da densidade do solo em cada pressão aplicada. QA-TPA = quintal agroflorestal em terra preta; CC-TPA = preparo convencional em terra preta; PC-TPA = monocultivo de laranja em terra preta; CC-TM = preparo convencional em terra mulata. $n = 10$.

3.6 Modelagem da CSC do solo do tratamento de referência

Na Tabela 4 são apresentados parâmetros dos modelos de capacidade de suporte carga (CSC) [$\sigma_p = 10^{(a + b \theta)}$] e os resultados do teste de homogeneidade das variâncias, segundo sugestão de Snedecor e Cochran (1989), para o tratamento de referencia (VN-TPA).

Os três modelos de capacidade de suporte de carga do solo, ajustados para as camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m, e 0,20 – 0,30 m de VN-TPA, e seus respectivos parâmetros lineares “a” e angulares “b,” não apresentaram diferenças significativas (Tab. 4). Desse modo, um novo ajuste foi feito com a população de dados de σ_p e θ

das três camadas, o que possibilitou a obtenção de um novo modelo ($n = 60$), o qual passa a descrever, portanto, o comportamento da CSC dos solos antropogênicos sob a condição de mata nativa, até a profundidade de 0,30 m. O comportamento compressivo do solo em função de σ_p e θ foi então discutido a partir desse novo modelo (Fig. 12b).

Os parâmetros lineares (2,77, 2,81 e 2,83) e angulares (-1,17, -1,19 e -1,24), obtidos para três camadas de solo, apesar de variarem com tendência de aumento em profundidade, indicando aumento na CSC do solo, não diferiram estatisticamente. Entretanto, os elevados valores de R^2 (0,83 a 0,86) foram significativos ($p < 0,0001$), destacando o papel controlador da água sobre capacidade de suporte de carga do solo, independentemente das variações associadas a cada camada, como a história de tensão e os atributos físico-químicos (Tab. 4; Fig. 12a).

Tabela 4. Coeficientes dos modelos de capacidade de suporte carga (CSC) [$\sigma_p = 10^{(a + b \theta)}$] de um solo antropogênico com floresta nativa, e as significâncias do teste de homogeneidade das variâncias, segundo sugestão de Snedecor e Cochran (1989).

Camada do solo (m)	Parâmetros do modelo de CSC			p-valor	
	Coef. linear (a)	Coef. angular (b)	R^2	a	b
0,00 - 0,10	2,766	-1,171	0,86**	<0,0001	<0,0001
0,10 - 0,20	2,811	-1,189	0,83**	<0,0001	<0,0001
0,20 - 0,30	2,829	-1,237	0,86**	<0,0001	<0,0001
Comparação dos modelos de CSC de acordo com Snedecor e Cochran (1989)					
Comparando as camadas	Teste de homogeneidade das variâncias				
		HV	a_1	b_2	
0,00-0,10 vs 0,10-0,20	p-valor	0,3588 ^{ns}	0,0951 ^{ns}	0,3607 ^{ns}	
0,00-0,10 vs 0,20-0,30	p-valor	0,3047 ^{ns}	0,0602 ^{ns}	0,2017 ^{ns}	
0,10-0,20 vs 0,20-0,30	p-valor	0,192 ^{ns}	0,0553 ^{ns}	0,5060 ^{ns}	

HV = testa a homogeneidade das variâncias do modelo; a_1 = testa a homogeneidade das variâncias do coeficiente linear; b_2 = testa a homogeneidade das variâncias do coeficiente angular; e ns = não significativo.

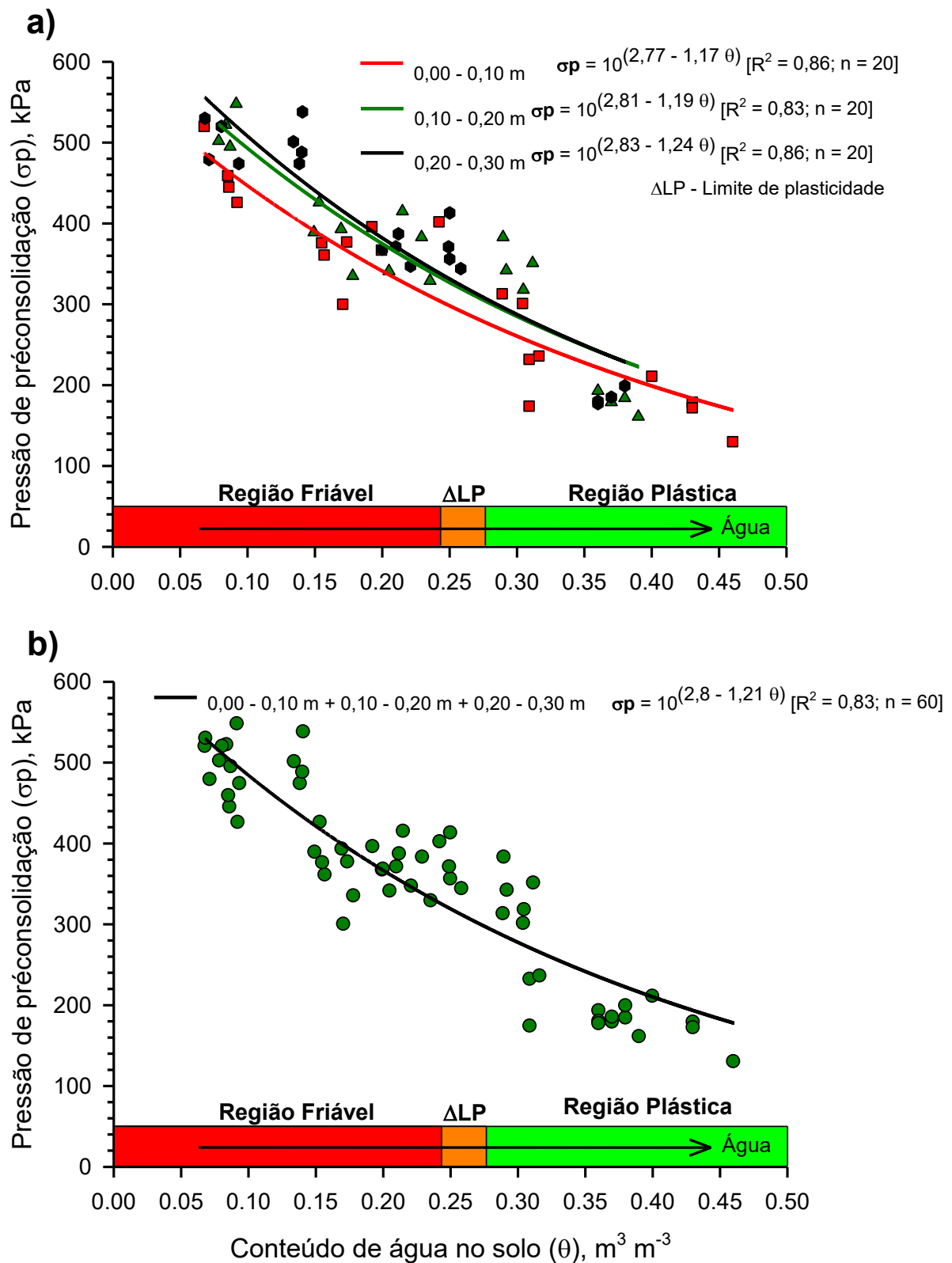


Figura 12. Modelos de capacidade de suporte de carga nas camadas 0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m em uma terra preta da Amazônia sob floresta nativa no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.

O impacto da mudança de uso da terra sobre a compressibilidade dos solos antropogênicos pode ser observado na Figura 13. Nesse caso, para avaliar o efeito da MUT, foi considerado o histórico de tensão provocado pelas práticas de uso em cada tratamento, isolando o efeito da umidade, e adotando como referência a floresta nativa (VN-TPA) (Fig. 12b). Assim, a partir dos valores de σ_p nos tratamentos QA-TPA, CC-TPA, PC-TPA, e CC-TM, no solo sob a condição friável (θ_1) e na condição plástica (θ_2), procedeu-se a comparação em relação ao modelo de capacidade de suporte de carga desenvolvido no tratamento VN-TPA (Fig. 13b), seguindo a proposição de Dias Junior et al. (2005) (Fig. 5).

3.7 O impacto do manejo na compactação dos solos antropogênicos

Na Figura 13 estão apresentados os resultados de σ_p estimados para o solo nas condições friável e plástica das três camadas de solo, comparando-os com modelo de CSC do solo ajustado para o tratamento de referência (VN-TPA).

a) Camada 0,00 – 0,10 m

No solo sob consistência friável (θ_1), para a área com quintal agroflorestal (QA-TPA), 100% das amostras de solo da camada superficial (0,00 – 0,10 m) apresentaram ocorrência de compactação adicional (região “a”). Sob consistência plástica (θ_2), 60% das amostras de QA-TPA apresentaram-se na região “b”, indicando que podem sofrer compactação do solo se as pressões aplicadas forem maiores que sua CSC, e 40% das amostras indicam não haver compactação adicional (região “c”) (Fig. 13a).

Ainda na camada 0,00 – 0,10 m, em θ_1 , 90% das amostras do tratamento com práticas convencionais de preparo do solo (CC-TPA), mostraram compactação adicional do solo (região “a”), enquanto apenas 10% indicam ausência de compactação (região “c”). Em θ_2 , 70% das amostras de CC-TPA apresentaram compactação adicional do solo (região “a”), 20% das amostras podem sofrer compactação (região “b”), e 10% das amostras foram classificadas sem compactação (região “c”).

Na condição θ_1 de umidade do solo, 90% das amostras de solo da área com monocultivo de citros (PC-TPA) mostraram ocorrência de compactação (região “a”), e 10% podem sofrer compactação do solo se a capacidade de suporte de carga não for respeitada. Em θ_2 , 10% das amostras indicam compactação adicional (região “a”), 40% tendem à compactação se as pressões aplicadas forem maiores que a sua CSC

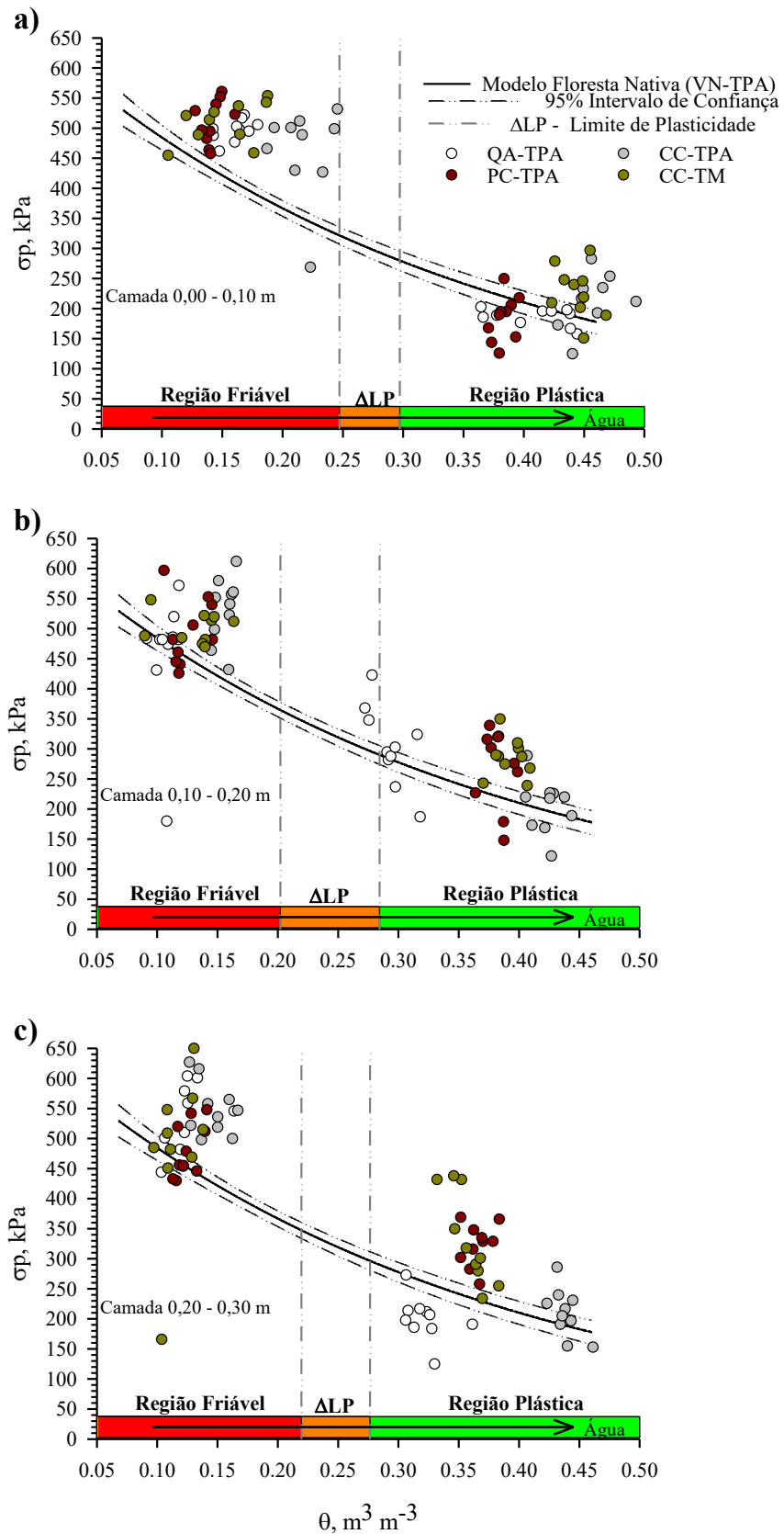


Figura 13. Pressão de préconsolidação (σ_p) em solos antropogênicos, sob diferentes tipos de manejo, consistência [θ_1 e θ_2], e camadas de solo, tendo como referência o modelo de CSC da floresta nativa sobre um Antrossolo no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil. $n = 10$.

(região “b”), e 50% não sofreram compactação adicional, indicando alívio das tensões no solo (região “c”) (Fig. 13a).

Para a condição de umidade θ_1 , na camada 0,00 – 0,10, constatou-se maior compactação do solo na área manejada convencionalmente sobre terra mulata (CC-TM), pois 90% das amostras apresentaram compactação adicional, e 10% podem sofrer compactação se a CSC não for respeitada (região “b”). Por outro lado, na umidade θ_2 , 60% das amostras sofreram compactação adicional (região “a”), 30% podem sofrer compactação (região “b”), e 10% não foram compactadas (região “c”) (Fig. 13a).

b) Camada 0,10 – 0,20 m

Foi constatado que 20% das amostras do tratamento QA-TPA, na umidade θ_1 , apresentaram compactação adicional do solo (região “a”), e 60% das amostras podem sofrer compactação se as pressões aplicadas forem maiores que o limite superior do intervalo de confiança (região “b”), e 20% não mostraram compactação (região “c”) (Fig. 11b). Na análise do solo na consistência θ_2 , 40% das amostras apresentaram compactação adicional (região “a”), 40% podem sofrer compactação se a CSC não for respeitada (região “b”), e 20% mostraram ausência de compactação adicional (região “c”) (Fig. 13b).

Em 90% das amostras de solo do tratamento CC-TPA, foi evidenciado compactação adicional do solo (região “a”) na condição de friabilidade θ_1 , e apenas 10% das amostras não apresentaram compactação (região “c”). Quando o solo foi avaliado na sua condição de plasticidade (θ_2), 20% das amostras apresentaram compactação adicional (região “a”), 60% mostraram tendência à compactação caso não sejam respeitados os valores de pressões definidos pelo limite superior do intervalo de confiança (região “b”), e 20% dessas amostras não apresentaram compactação (região “c”) (Fig. 13b).

Quando o solo foi submetido a sua condição mais seca (θ_1), 50% das amostras de solo do tratamento PC-TPA, mostraram compactação adicional (região “a”), 40% das amostras foram plotadas na região “b”, indicando que podem sofrer compactação se a capacidade de suporte de carga não for respeitada, e apenas 10% das amostras não apresentaram compactação adicional (região “c”). Por outro lado, no solo mais úmido (θ_2), 70% das amostras apresentaram compactação adicional (região “a”), 10%

apresentam tendência à compactação (região “b”), e 20% mostraram-se com ausência de compactação (região “c”) (Fig. 13b).

Foi constatada uma maior compactação no tratamento CC-TM na umidade θ_1 , uma vez que 80% das amostras de solo apresentaram compactação adicional (região “a”), enquanto 20% das amostras foram plotadas na região “b”, indicando que podem sofrer compactação se a CSC não for respeitada. Um comportamento similar foi observado na umidade θ_2 , nesse caso, 90% das amostras apresentaram compactação adicional (região “a”), enquanto apenas 10% apresentaram tendência à compactação (região “b”) (Fig. 13b).

c) Camada 0,20 – 0,30 m

No solo do tratamento QA-TPA na umidade θ_1 , 60% das amostras de solo indicam compactação adicional (região “a”), 30% com tendência a sofrer compactação (região “b”), e 10% sem compactação, indicando alívio de tensão (região “c”), quando comparado ao solo na mata nativa. Contudo, quando o solo foi submetido à consistência θ_2 , 90% das amostras mostraram compactação adicional, e 10% podem sofrer compactação se a CSC não for respeitada (região “b”) (Fig. 13c).

Cem por cento (100%) das amostras de solo do tratamento CC-TPA quando submetidas à condição friável (θ_1), indicam compactação adicional (região “a”) e reiteram o impacto das práticas agrícolas deste manejo, mesmo com o solo sob condições de baixa umidade. No solo sob condição de plasticidade θ_2 , 30% das amostras apresentaram compactação adicional do solo (região “a”), 60% podem sofrer compactação se as pressões aplicadas forem acima da CSC definida pelo limite superior do intervalo de confiança (região “b”), e apenas 10% não apresentaram compactação adicional (região “c”). Neste tratamento, nota-se que apesar do papel controlador da água sobre o comportamento mecânico do solo (Fig. 13c), as práticas de uso e manejo, e a história de tensão no solo ganham evidência.

No tratamento com monocultivo de citros (PC-TPA), 40% das amostras de solo apresentaram compactação adicional (região “a”), 40% podem sofrer compactação (região “b”), e 20% das amostras não apresentaram compactação (região “c”), ambos sob a condição de umidade θ_1 (Fig. 13c). Quando a análise foi realizada na umidade θ_2 , 90% das amostras mostraram-se com compactação adicional do solo (região “a”),

e 10% das amostras com tendência à compactação adicional se a CSC não for respeitada (Fig. 13c).

Por fim, o solo do tratamento CC-TM, na umidade θ_1 , mostrou 50% das amostras de solo com compactação adicional (região “a”), 40% podem sofrer compactação (região “b”), e 10% das amostras mostraram ausência de compactação (região “c”). Por outro lado, quando se aumentou a umidade do solo (θ_2), 90% das amostras de solo apresentaram compactação adicional (região “a”), e 10% tendem a sofrer compactação se a CSC definida pelo limite superior do intervalo de confiança não for respeitada (região “b”) (Fig. 13c).

3.8 Interação entre os atributos físico-mecânicos e COT

Os resultados da análise de correlação de Pearson apresentados na Figura 14, mostraram forte correlação positiva entre os atributos silte e LP ($r = 0,66$, $p < 0,001$), silte e COT ($r = 0,62$, $p < 0,001$), θ e m ($r = 0,72$, $p < 0,001$), σ_p e RP ($r = 0,87$, $p < 0,001$), e LP e COT ($r = 0,68$, $p < 0,001$). Por outro lado, fortes correlações negativas foram observadas entre os atributos argila e silte ($r = -0,79$, $p < 0,001$), argila e LP ($r = -0,52$, $p < 0,001$), argila e COT ($r = -0,52$, $p < 0,001$), argila e areia ($r = -0,46$, $p < 0,001$), silte e Dp ($r = -0,57$, $p < 0,001$), Dp e COT ($r = -0,73$, $p < 0,001$), Dp e LP ($r = -0,63$, $p < 0,001$), Ds e PT ($r = -0,85$, $p < 0,001$), θ e RP ($r = -0,84$, $p < 0,001$), θ e σ_p ($r = -0,83$, $p < 0,001$), σ_p e m ($r = -0,65$, $p < 0,001$), e RP e m ($r = -0,72$, $p < 0,001$).

Parâmetros e resultados das doze variáveis obtidos pela Análise de Componentes Principais (ACP) para os diferentes tipos de uso e manejo sobre solos antropogênicos da Amazônia Central brasileira, são apresentados na Tabela 5.

Os componentes principais (CP) foram sistematizados adotando o critério de Kaiser, o qual preconiza que apenas os componentes com autovalores cima de 1 (um) devem ser considerados, pois esses componentes explicam mais variância do que uma variável padronizada (Kaiser, 1960).

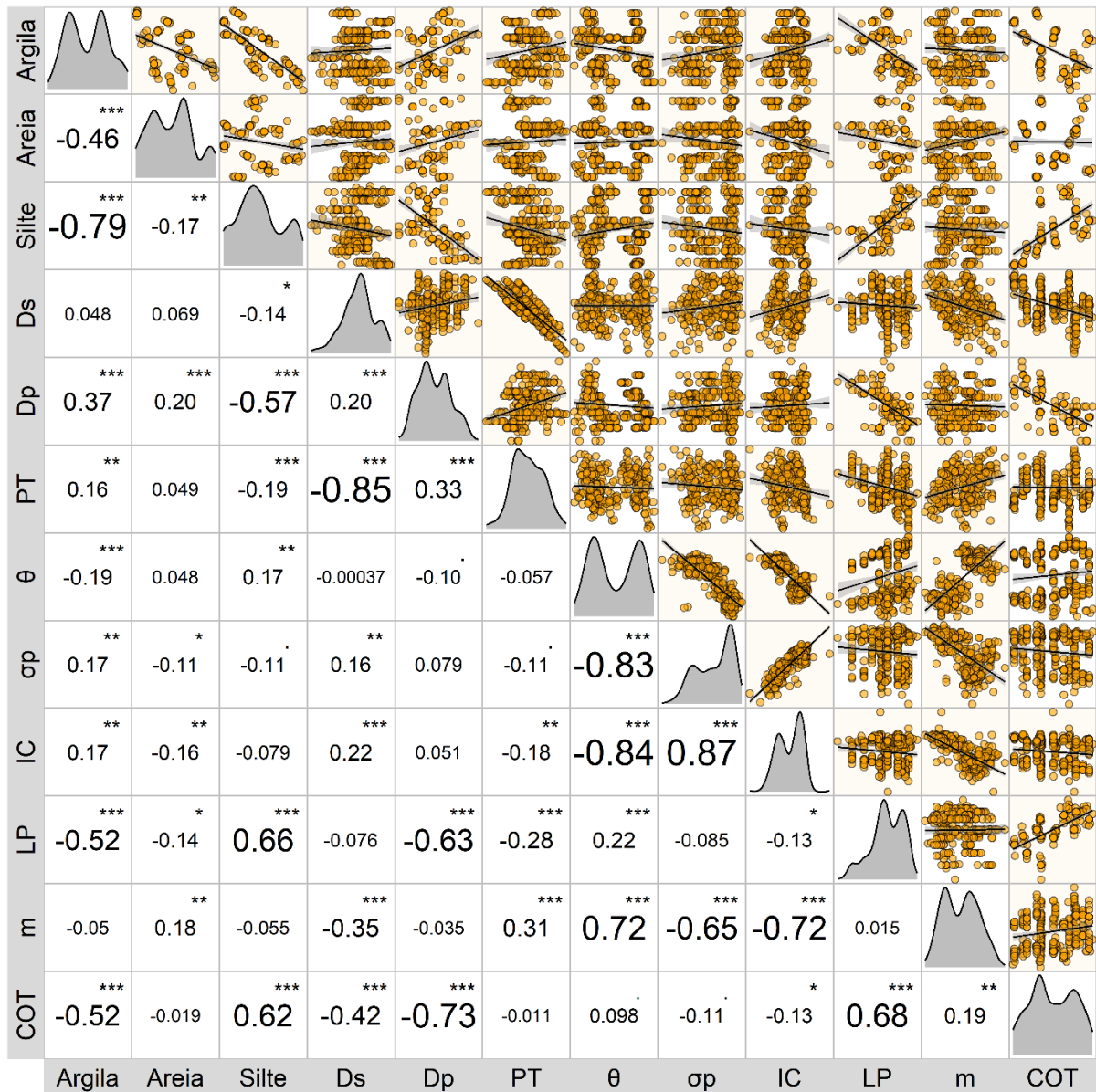


Figura 14. Matriz de correlação entre os atributos físicos, mecânicos e carbono total de solos antropogênicos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil. Ds = densidade do solo; Dp = densidade das partículas do solo; PT = porosidade total; θ = umidade volumétrica; σ_p = pressão de préconsolidação; IC = índice de cone; m = índice de compressão do solo; COT = carbono orgânico total. * = $p < 0,05$; ** = $p < 0,01$; *** = $p < 0,001$.

Tabela 5. Parâmetros da análise de componentes principais entre os atributos físico-mecânicos e carbono de solos antropogênicos sob diferentes usos no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil.

Parâmetros de ACP	Camadas de solo, m					
	0,00 - 0,10		0,10 - 0,20		0,20 - 0,30	
Componentes principais (CP)	CP1	CP2	CP1	CP2	CP1	CP2
Autovalores	3,617	3,370	4,301	3,383	3,748	3,094
Percentagem de variância explicada (%)	30,138	28,085	35,845	28,190	31,236	25,785
Percentagem de variância explicada cumulativa (%)	30,100	58,223	35,100	64,035	31,236	57,021
Variáveis	Correlação das variáveis com os componentes principais (<i>loadings</i>)					
Argila, g kg ⁻¹	-0,75	0,15	0,32	0,03	-0,66	0,18
Areia, g kg ⁻¹	-0,62	-0,25	0,94	0,06	-0,54	-0,33
Silte, g kg ⁻¹	0,84	0,08	-0,79	-0,06	0,92	-0,02
Ds, Mg m ⁻³	0,39	-0,36	0,18	0,38	-0,17	-0,68
Dp, Mg m ⁻³	-0,61	-0,32	0,90	0,09	-0,85	-0,002
PT, m ³ m ⁻³	-0,57	0,23	0,53	-0,31	-0,32	0,62
θ , m ³ m ⁻³	0,15	0,78	-0,08	-0,88	0,02	0,74
σ_p , kPa	0,12	-0,84	0,02	0,89	0,04	-0,73
IC, MPa	0,27	-0,82	-0,04	0,91	0,20	-0,51
LP, m ³ m ⁻³	0,87	0,24	-0,83	0,06	0,74	0,19
<i>m</i>	-0,26	0,87	0,23	-0,84	-0,18	0,83
COT, g kg ⁻¹	0,42	0,45	-0,91	-0,10	0,84	0,18

Ds = densidade do solo; Dp = densidade das partículas do solo; PT = porosidade total; θ = umidade volumétrica; σ_p = pressão de préconsolidação; IC = índice de cone; LP = limite de plasticidade; *m* = índice de compressão do solo; COT = carbono orgânico total.

A partir da aplicação desse método nas três camadas do solo (0,00 – 0,10 m, 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m), observou-se que pelo menos três componentes principais de cada camada, apresentaram autovalores maiores que 1(um) (Fig. 15).

Na camada 0,00 – 0,10 m, os autovalores variaram de 3,627, 3,370, 2,365 e 1,467, nos componentes CP1, CP2, CP3 e CP4, respectivamente. Na camada 0,10 – 0,20 m, os autovalores seguiram a seguinte sequência: 4,301, 3,383, 1,793 e 1,492, nos componentes CP1, CP2, CP3 e CP4, respectivamente, e na camada 0,20 – 0,30 m, os autovalores foram de 3,748, 3,094 e 2,133 para o CP1, CP2 e CP3, respectivamente (Fig. 15).

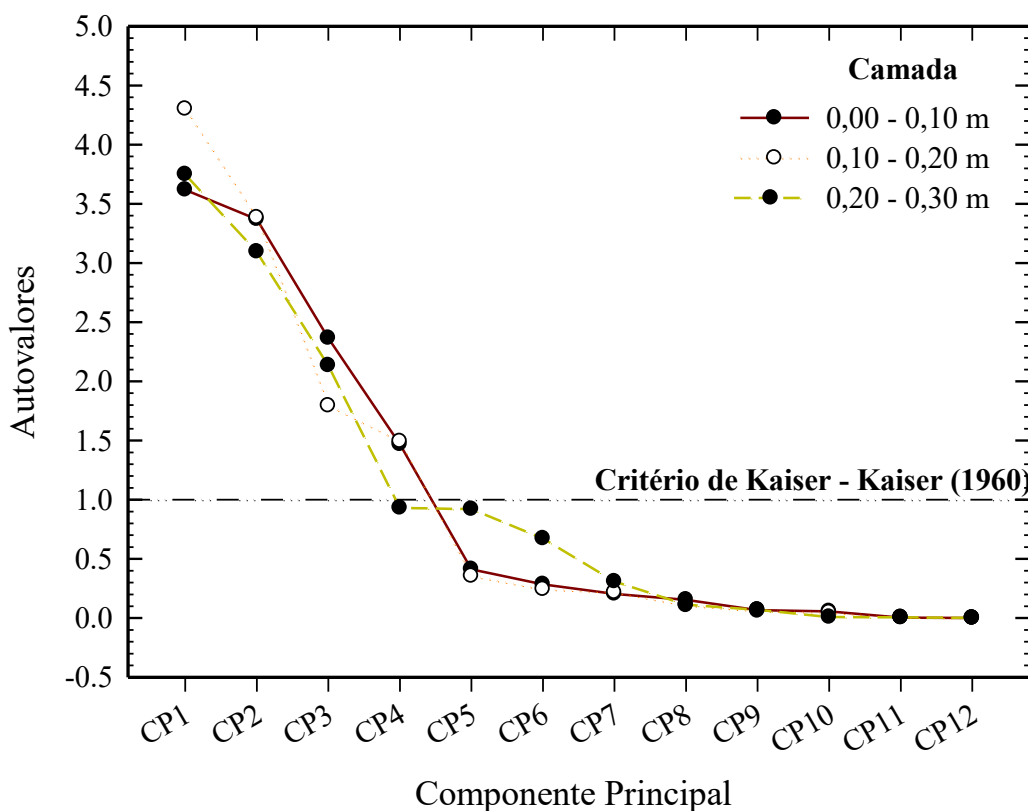


Figura 15. Screeplot dos componentes principais, indicando os autovalores maiores que 1 (um), usado na interpretação da análise dos componentes principais.

Para a análise de componentes principais (ACP) de cada camada, foram utilizados o primeiro (CP1) e o segundo componente principal (CP2), uma vez que esses

explicam a maior variância na análise. Na camada 0,00 – 0,10 m, a variação coletada no CP1 e CP2 foi de 30,138 e 28,085%, respectivamente. Na camada 0,10 – 0,20 m, 35,845% da variância foi explicada pelo CP1, e 28,19% da variância foi coletada pelo CP2. Na camada 0,20 – 0,30 m, os componentes CP1 e CP2 apresentaram 31,236 e 25,785% da variância explicada, respectivamente (Tab. 5). Dessa forma, a ACP na camada 0,00 – 0,10 m obteve 58,22% da variância total explicada, enquanto para as camadas 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, essa variância total foi de 64,03 e 57,02%, respectivamente (Tab. 5).

Na ACP da camada 0,00 – 0,10 m, observou-se uma forte correlação positiva entre as variáveis Silte e LP com o CP1, enquanto os atributos Argila, Areia, Dp e PT mostraram uma forte correlação negativa. Por outro lado, observou-se uma forte correlação positiva do CP2 com as variáveis θ e m , enquanto os atributos mecânicos σ_p e IC apresentaram forte correlação negativa (Tab. 5; Fig. 16a). Na camada 0,10 – 0,20 m, foram observadas fortes correlações positivas entre o CP1 e os atributos Areia, Dp e PT, e uma forte correlação negativa ocorreu entre o CP1 com as variáveis Silte, LP e COT. Fortes correlações positivas foram observadas entre o CP2 com os atributos mecânicos σ_p e IC, e além disso, as fortes correlações negativas foram constatadas entre os atributos θ e m com o CP2 (Tab. 5; Fig. 16b). Na ACP da camada 0,20 – 0,30 m, o CP1 foi correlacionado positivamente com Silte, LP e COT, enquanto os atributos Argila, Areia e Dp, exibiram fortes correlações negativas com esse componente principal. Além disso, as variáveis PT, θ e m , demonstraram fortes correlações positivas com o CP2, enquanto que a Ds, σ_p e IC, apresentaram forte correlação negativa com o mesmo (Tab. 5; Fig. 16c).

A aplicação da análise de componentes principais (ACP) evidenciou que as relações entre os atributos físico-mecânicos e carbono dos solos antropogênicos variaram conforme o tipo de uso da terra. Na camada 0,00 – 0,10 m, ficou evidente que o tratamento CC-TPA se diferenciou de PC-TPA e VN-TPA. Essa distinção foi atribuída, principalmente, aos maiores valores de LP e Silte observados em CC-TPA, bem como à maior porosidade total e às características texturais, que foram similares entre os tratamentos PC-TPA e VN-TPA (Fig. 16a).

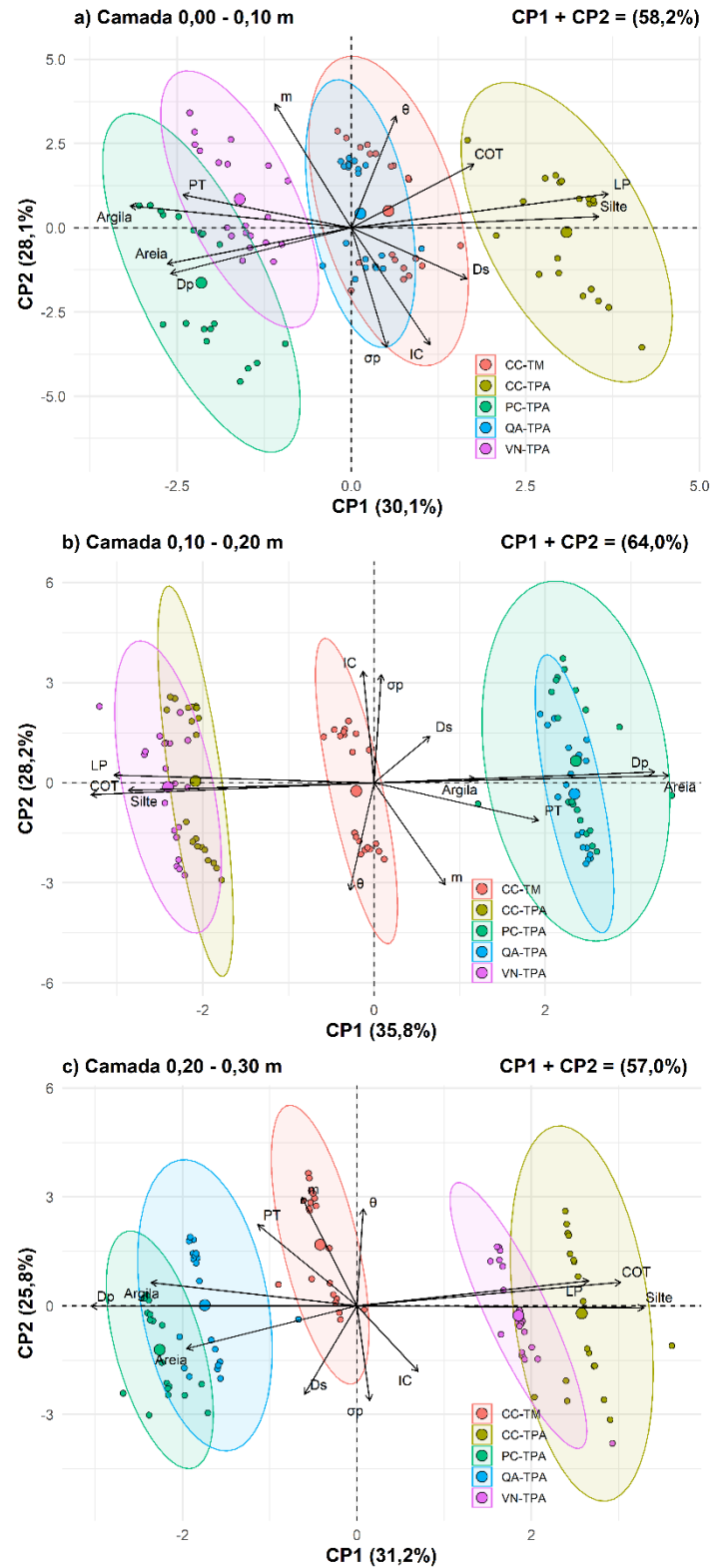


Figura 16. Gráfico Biplot do primeiro e segundo componente da ACP com todas as observações simultâneas das variáveis físicas, mecânicas e químicas nos diferentes usos do solo.

Na camada 0,10 – 0,20 m, nota-se que as elipses dos tratamentos PC-TPA e QA-TPA apresentaram comportamentos semelhantes, regulados principalmente pelos maiores valores da fração Areia e Dp. Todavia, os tratamentos VN-TPA e CC-TPA também exibiram elipses semelhantes, desta vez, devido aos maiores valores de LP, COT e Silte (Fig. 16b).

Por fim, na camada 0,20 – 0,30 m, as diferenças entre os tipos de uso da terra também foram evidentes. O comportamento observado foi similar ao da camada 0,10 – 0,20 m, com os tratamentos CC-TPA e VN-TPA mostrando padrões semelhantes e distintos dos demais, enquanto QA-TPA e PC-TPA apresentaram comportamentos próximos entre si (Fig. 16c).

4 DISCUSSÃO

4.1 Características e alterações dos atributos físicos em solos antropogênicos sob diferentes usos e manejo na Amazônia

Os resultados da granulometria das partículas e respectivas texturas dos solos antropogênicos desta pesquisa, estão de acordo com os encontrados por Campos et al. (2011). Brito et al. (2018) também avaliaram áreas sob diferentes formas de cultivos em solos antropogênicos da Amazônia, e constataram que a variação textural pode envolver maiores proporções da fração areia, alcançando valores de 714 g kg^{-1} , bem como a predominância das frações mais finas do solo, como maiores teores de silte, com valores de até 617 g kg^{-1} . Desse modo, a classe textural dos solos de origem antrópica, como as Terras Pretas e Terras Mulatas, pode variar de arenosa a muito argilosa, sendo a gênese desses solos o principal fator responsável por essas variações, uma vez que a sua formação está relacionada às diferentes formas de ocupação por povos indígenas pré-colombianos (Lima et al., 2002; Lombardo et al., 2022).

Os valores médios da densidade de partículas do solo (Dp) obtidos pelo método da pipeta, foram semelhantes aos reportados por Barbosa e Teixeira (2003), que encontraram $2,59 \text{ Mg m}^{-3}$ em uma Terra Preta de Índio na região de Rio Preto da Eva, Amazonas. Esses mesmos autores comprovaram que os elevados teores de matéria

orgânica reduziram a densidade de partículas minerais das Terras Pretas Antropogênicas.

Diante disso, acredita-se que os baixos valores de D_p encontrados neste estudo podem estar relacionados aos “finos” de carvão (biochar) existentes no horizonte A antrópico. Estudos indicam que as altas proporções de biochar no solo, podem causar redução da densidade das partículas dos horizontes superficiais de Latossolos amazônicos (Ribeiro et al., 2022), uma vez que esse material contém altos teores de carbono orgânico com baixas densidades (Githinji, 2014), sendo capaz de diminuir a D_p em até 14% (Usowicz et al., 2016). Esse efeito redutor é mais acentuado em solos com textura mais arenosa (Blanco-Canqui, 2017), como os apresentados nesta pesquisa (Tab. 1).

A presença de maiores teores de carbono e a mineralogia ainda desconhecida dos solos antropogênicos deste estudo, pode ter influenciado também os baixos valores de D_p . O efeito do material orgânico sobre esse atributo pode ser evidenciado por esses baixos valores de D_p em comparação aos encontrados nos horizontes A de solos naturais (Zaninetti et al., 2016), bem como pela significativa correlação (negativa) observada entre COT e D_p ($r = -0,73$, $p < 0,001$; Fig. 14). Vale destacar que em solos minerais é comum encontrar valores de D_p igual ou superior a $2,50 \text{ Mg m}^{-3}$, como evidenciado por Zaninetti et al. (2016), quando investigaram as características físicas de um Latossolo Amarelo em uma floresta primária na Amazônia.

Nos solos antropogênicos desta pesquisa, os valores médios de D_p foram menores que $2,50 \text{ Mg m}^{-3}$ em todos os tratamentos (Tab. 1). Esses resultados divergem daqueles encontrado por Soares et al. (2021), quando avaliaram o efeito do uso e manejo do solo sobre uma Terra Preta Arqueológica com teores de areia superiores a 700 g kg^{-1} . Esses autores observaram valores médios de D_p acima dos apresentados nesta pesquisa, bem como uma pequena variação da D_p ($2,74$, $2,75$ e $2,83 \text{ Mg m}^{-3}$) entre os ambientes de feijão-guandu, floresta nativa e pastagem, respectivamente. Ainda assim, os autores não constataram diferenças significativas entre esses valores em função do uso do solo, o que reforça a hipótese de que a estabilidade desse atributo se deve as diferentes formas da matéria orgânica, e às características mineralógicas desses solos antrópicos.

O impacto da ação humana sobre a densidade do solo (Ds) foi evidenciado principalmente na camada superficial de 0,00 – 0,10 m (Tab. 1), uma vez que nessa camada todos os usos promoveram aumento da Ds em comparação a floresta nativa (VN-TPA). O maior grau de significância foi observado nos tratamentos CC-TPA e PC-TPA em todas as camadas, quando comparados com VN-TPA.

O aumento da Ds em CC-TPA deve estar associado as constantes práticas mecanizadas nas diferentes etapas de manejo do solo. A trafegabilidade nessa área, ocorreu sem o monitoramento da umidade e da capacidade de suporte de carga do solo (CSC) ao longo de 35 anos. Portanto, as pressões aplicadas sobre esse solo (história de tensão), principalmente em épocas de maior pluviosidade (dezembro-abril, Fig. 1), que pode condicionar o solo à consistência plástica (θ_2), contribuiu para o aumento da densidade do solo.

As pesquisas recentes de Brito et al. (2018); Soares et al. (2021) demonstram que o aumento da Ds em sítios antropogênicos, é devido, principalmente, ao pisoteio animal nos sistemas de pastagens. Mas poucos estudos avaliaram o efeito da mecanização agrícola em solos antropogênicos, o que destaca a exclusividade dos dados obtidos neste estudo sobre o impacto desses manejos na qualidade físico-mecânica desses solos.

Todavia, Teixeira e Martins (2003) observaram que mesmo após 40 anos de manejo convencional, um solo de Terra Preta amazônica, situado no município de Iranduba, não apresentou restrições ao crescimento vegetal. Os resultados dessa pesquisa vão ao encontro dos valores de Ds obtidos neste estudo, os quais em todos os tratamentos, permaneceram abaixo do limite crítico de $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$, como estabelecido para solos mais arenosos (Reynolds et al., 2002). Vale ressaltar que o estudo isolado desses autores não considerou o impacto da mudança de uso da terra, uma vez que as determinações foram restritas a um solo antropogênico sob manejo agrícola constante. Desse modo, a saúde física desses solos em resposta ao efeito permanente da vegetação de floresta nativa, e de sistemas tradicionais como os quintais agroflorestais e entre outros, também foram desconsiderados.

A redução da Ds em PC-TPA foi atribuída aos baixos teores de carbono orgânico do solo (COT), influenciados, provavelmente, pela substituição da cobertura vegetal nativa em sistema de monocultivo de citros. Esse tipo de agrossistema é

caracterizado pela baixa produção de biomassa abaixo e acima do solo, além da realização frequente de capinas entre as linhas de cultivo, o que limitou o acúmulo de COT por mais de quatro décadas. Além disso, o pisoteio humano durante as práticas de manejo, como capinas, podas e colheitas dos frutos, pode ter intensificado a compactação do solo, especialmente sob condições de elevada umidade do solo, promovendo deformações estruturais.

Nascimento et al. (2024), destacaram a importância do monitoramento dos impactos causados pela fruticultura tropical sobre propriedades físicas e químicas de solos antropogênicos amazônicos. Esses autores observaram que as práticas de manejo adotadas em agrossistemas frutícolas, podem deteriorar a qualidade desses solos, resultando no aumento da sua densidade e redução da porosidade total, efeitos consistentes com os encontrados neste estudo. O impacto da colheita manual dos frutos no aumento da densidade do solo e na resistência mecânica já foi discutido por Trindade et al. (2004) e Iori et. (2012), ao investigarem essa relação em agrossistemas de bananais. Para Lull (1959), o pisoteio humano exerce pressões na ordem de 190 kPa, as quais podem ser intensificadas quando combinadas com o peso adicional de sacos ou carregadores manuais, agravando, assim, o impacto no solo.

De acordo com as condições estabelecidas nesta pesquisa, a interação entre COT e Ds foi comprovada pela significativa correlação ($r = -0,42$, $p < 0,001$) apresentada na Figura 14. Resultados semelhantes foram reportados por Soares et al. (2021), que atribuíram a redução do carbono e o consequente aumento da densidade de solos antropogênicos à compactação causada pelo pisoteio animal, em contraste com áreas sob floresta amazônica na região sul do Amazonas.

O efeito observado na redução significativa da densidade do solo em CC-TM, especialmente na camada 0,20 – 0,30 m, foi atribuído ao preparo recente do solo, realizado 14 dias antes da coleta das amostras nessa área. O revolvimento do solo com grade aradora provocou a descompactação, resultando na diminuição da Ds no curto prazo. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Deperon Júnior et al. (2016), que observaram reduções significativas da Ds em função dessa prática nas camadas abaixo de 0,15 m de profundidade.

Independente do uso e das camadas avaliadas, a porosidade total (PT) dos solos antropogênicos nesta pesquisa, apresentou valores médios entre 0,39 a 0,47

$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$. Esses resultados são próximos daqueles reportados por Barros et al. (2016); Soares et al. (2021), ao estudarem o efeito dos manejos e da granulometria das partículas do solo sobre o comportamento físico de Terras Pretas da Amazônia. As pequenas variações da PT entre os resultados desta pesquisa e desses estudos são atribuídas, principalmente, ao efeito da textura dos diferentes sítios antropogênicos.

A porosidade total foi mais elevada nos tratamentos sem revolvimento do solo e com maior cobertura vegetal (VN-TPA e QA-TPA), nas camadas superficiais de 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m (Tab. 1). Estes resultados reiteram o importante papel da vegetação na estabilidade estrutural desses solos, principalmente na camada mais superficial do horizonte antrópico. Além disso, a forte correlação entre os atributos PT e Ds ($r = -0,85$, $p < 0,001$; Fig. 14) comprovou o efeito diferenciado dos manejos no aumento da densidade do solo, que refletiu diretamente na redução da porosidade total. Esse efeito foi claramente observado na camada 0,00 – 0,10 m, uma vez que a PT foi reduzida em todas as áreas antropizadas, indicando o impacto da ocupação humana e suas respectivas práticas de manejo sobre a estrutura do solo, concordando com os resultados de Cunha et al. (2017), Soares et al. (2021) e Nascimento et al. (2024). Vale destacar que a PT do tratamento CC-TM foi semelhante a observada em VN-TPA, exceto na camada 0,20 – 0,30 m, que pode ser atribuído ao revolvimento do solo pelo uso de grade aradora (Tab. 1).

4.2 O efeito do uso e práticas de manejo na consistência de solos antropogênicos da Amazônia

As diferenças observadas entre os valores do limite de plasticidade (LP) dos solos antropogênicos foram influenciadas por suas características granulométricas, e sobretudo, pelo impacto do uso e manejo nos teores de carbono orgânico total (COT). Os resultados das correlações entre os atributos LP e COT ($r = 0,68$; $p < 0,001$), LP e silte ($r = 0,66$; $p < 0,001$), e COT e silte ($r = 0,62$; $p < 0,001$; Fig. 12), reforçam essas evidências.

Na camada 0,00 – 0,10 m, os maiores valores de LP nos tratamentos QA-TPA, CC-TPA e CC-TM foram influenciados tanto pelo efeito dos maiores teores de COT quanto aos maiores teores de silte (Fig. 6). Na camada 0,10 – 0,20 m, as maiores

quantidades de COT e silte nos tratamentos VN-TPA e CC-TPA foram os principais fatores pelas maiores médias de LP (Fig. 6). Já na camada 0,20 – 0,30 m, os maiores teores de silte resultaram nos maiores valores do LP no tratamento CC-TPA (Fig. 6).

A contribuição das partículas mais finas do solo na associação organomineral já foi elucidada por Ramalho et al. (2022), ao pesquisarem o efeito dessas partículas no armazenamento e estabilização da matéria orgânica em diferentes solos antropogênicos da Amazônia brasileira. Esses autores observaram maiores acúmulos de COT associados à fração silte de um solo de Terra Preta com textura argilo-arenosa, semelhante aos solos antropogênicos deste estudo. Além disso, essa estabilização pode resultar tanto dos mecanismos desenvolvidos por partículas finas do solo quanto da presença de carbono pirogênico (biochar) oriundos das queimas na formação desses solos (Wiseman e Püttmann, 2006).

De modo geral, os solos antropogênicos apresentam altos teores de matéria orgânica estável em todo horizonte A antrópico (Rostain e McKey, 2023), no entanto, as diferenças observadas no COT em função do uso e manejo do solo foram suficientes para influenciar nos resultados dos LP deste estudo. Os maiores valores de LP no tratamento CC-TPA são associados ao maior acúmulo de COT, decorrente da aplicação de 10 Mg ha ano⁻¹ de adubo orgânico. Esse acúmulo possivelmente resultou em menores perdas de carbono do solo nas práticas de subsolagem, em comparação com o uso da grade aradora no tratamento CC-TM.

O decréscimo do LP reduz a região friável com consequente aumento da região plástica do solo, tornando o solo mais susceptível às deformações não-recuperáveis (Kondo e Dias Junior, 1999b). Todavia, o aumento do teor de matéria orgânica tende a elevar os limites de consistência do solo, reduzindo o risco de deformações plásticas (Stone e Ekwue, 1993; Vasconcelos et al., 2010), já que nesse caso há também um aumento da superfície específica das partículas do solo, com consequente elevação da capacidade de adsorção de água (Kondo e Dias Junior, 1999b).

Os solos antropogênicos da Amazônia, devido aos seus elevados teores de matéria orgânica, geralmente apresentam uma consistência friável quando úmidos e variam de não plásticos a ligeiramente plásticos quando molhados. E esse comportamento também está diretamente relacionado às suas características estruturais (Campos et al., 2011; Santos et al., 2013).

4.3 Comportamento mecânico dos solos antropogênicos em função da consistência do solo e práticas de manejo

Independente do uso, manejo ou camadas avaliadas, todos os atributos mecânicos foram influenciados pelas diferentes condições de consistência a que o solo foi submetido (Tab. 2). Esta constatação foi comprovada com base nas correlações entre θ e m ($r = 0,72$; $p < 0,001$), θ e IC ($r = -0,85$; $p < 0,001$) e θ e σ_p ($r = -0,83$; $p < 0,001$; Fig. 14), bem como pelas variações observadas nas envoltórias de resistência ao cisalhamento (Fig. 7).

As diferenças observadas entre os parâmetros coesão aparente (c) e ângulo de atrito interno (ϕ) foram influenciadas pelo efeito das práticas de manejo nesses solos antropogênicos. Isso evidencia que a tensão cisalhante (τ_c) pode ser um indicador relevante em estudos sobre o comportamento dinâmico dos solos de origem antrópica na Amazônia, especialmente diante do impacto do avanço das práticas agrícolas.

Stafford e Tauner (1976); Robbins et al. (1988); Yao e Zen (1988), apontam que os valores desses parâmetros (c e ϕ) podem ser diretamente influenciados pela porosidade do solo, pelo conteúdo de água e pelo tamanho das partículas minerais. Por outro lado, os resultados desta pesquisa indicam que a maior resistência ao cisalhamento esteve principalmente associada às altas densidades do solo na camada superficial, resultantes das práticas mecanizadas e ausência de cobertura vegetal nos tratamentos CC-TPA e PC-TPA, respectivamente (Tab. 2).

Estes achados estão em consonância com os de Silva et al. (2004), que atribuíram os maiores valores de RC ao tráfego de rodados agrícolas ao longo do tempo. Nessas condições, solos compactados ou mais adensados tendem a apresentar maior resistência ao cisalhamento (Azevedo, 1999), devido ao aumento do contato entre as partículas, o que intensifica o atrito entre elas (Terzaghi et al., 1997; Rocha et al., 2002). Radford et al. (2000) avaliando o efeito da compactação do solo sobre a resistência ao cisalhamento, ocasionada pelo tráfego agrícola em um Vertissolo, verificaram que o aumento da RC pode ocorrer até a camada de 0,20 m do solo.

Além disso, a maior RC observada no quintal agroflorestal (QA-TPA) pode estar relacionada às características desse sistema, como o maior teor de areia, o alto

conteúdo de matéria orgânica no solo e a maior atuação das raízes na camada superficial (0,00–0,10 m), uma vez que esse ambiente apresenta maior diversidade vegetal (Tab. 2).

Rocha et al. (2002), ao estudarem a RC em cinco classes de solos de origem natural, observaram um aumento da resistência ao cisalhamento com o incremento do teor de areia. Além disso, os maiores teores de matéria orgânica, associados ao modelo de agregação do solo e ao mecanismo de emaranhamento promovido pelas raízes, bem como à presença de ligações físico-químicas típicas de ambientes nativos ou menos antropizados, como os quintais agroflorestais, favorecem a agregação do solo e, conseqüentemente, aumentam sua resistência mecânica (Tisdall e Oades, 1982; Campos et al., 1995; Terzaghi et al., 1996; Jastrow et al., 1998; Silva et al., 2004).

Sob a consistência friável (θ_1), os solos antropogênicos apresentaram maiores índices de cone (IC) e pressão de préconsolidação (σ_p), além de menores índices de compressão do solo (m). Quando se aumentou a umidade alcançando a consistência plástica (θ_2), houve redução nos valores de IC e σ_p , acompanhada por um aumento no m (Tab. 2).

Os resultados indicam que os maiores valores de IC e σ_p nos tratamentos com práticas agrícolas estão associados ao aumento da densidade do solo, decorrente da mecanização e da ausência de cobertura vegetal por longos períodos, o que leva a perdas de COT. Esse aumento da densidade do solo, por sua vez, tende a elevar a σ_p dos solos antropogênicos (Soares et al., 2021). Além disso, o impacto antrópico foi mais evidente na camada 0,00 – 0,10 m, indicando uma maior susceptibilidade da camada superficial às alterações mecânicas do solo. Na consistência friável (θ_1) dessa camada, todos os tratamentos apresentaram valores de σ_p superiores aos observados em VN-TPA, além de maiores valores de IC observados em CC-TPA e PC-TPA (Tab. 2).

Esses resultados estão em conformidade com os reportados por Brito et al. (2018); Soares et al. (2021), que também identificaram alterações na resistência mecânica do solo na camada 0,00 – 0,10 m de solos antropogênicos sob diferentes usos. Esses autores concluíram que os aumentos significativos na resistência do solo à

penetração, e na pressão de préconsolidação, estão associados principalmente ao pisoteio animal em agrossistemas pastoris sobre Terras Pretas da Amazônia.

Os maiores valores de IC observados em CC-TPA e PC-TPA sob θ_1 , demonstram que o impacto das práticas de manejo em solos antropogênicos pode atingir camadas mais subsuperficiais de até 0,30 m (Tab. 2). Por outro lado, os menores IC do tratamento CC-TM e a ausência de significância para σ_p sob essa consistência, em comparação ao tratamento com vegetação nativa (VN-TPA) nas camadas 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m, deve-se, principalmente, à redução transitória da densidade do solo pelo preparo recente com grade aradora em CC-TM (Tab. 2). Todavia, os maiores valores do IC em VN-TPA nessas mesmas camadas sob as duas consistências (θ_1 e θ_2) podem estar associados tanto à maior coesão resultante das maiores quantidades das frações organominerais (associação entre os elevados teores de matéria e as maiores frações de argila e silte) quando comparado a CC-TM na consistência θ_1 , quanto à presença de fragmentos cerâmicos no interior das amostras indeformadas, os quais podem aumentar a resistência do solo à penetração no momento do ensaio, independente dos teores de água.

Poucos estudos abordam sobre a coesão dos solos antropogênicos, evidenciando uma lacuna de conhecimento sobre a alta coesão das Terras Pretas e Terras Mulatas (Teixeira et al., 2009). Essa característica justifica a necessidade do uso de implementos agrícolas no preparo desses solos, como observado nos tratamentos CC-TPA e CC-TM.

Os maiores valores de IC, mesmo nas duas consistências estabelecidas para este estudo, podem estar associados a elevada tenacidade (quando seco), conforme relatado por Neves Júnior (2008), que chama atenção para a limitação ao crescimento das raízes nesses solos devido a elevada resistência mecânica à penetração, ou alta coesão. Nota-se também que em baixo conteúdo de água (θ_1) os valores de IC deste estudo variaram de 8,4 a 22,2 MPa, enquanto na consistência plástica (θ_2) os valores foram expressivamente menores (< 50%) (Tab. 2). Esse comportamento se deve a ação lubrificante da água entre as partículas do solo, favorecendo a redução do atrito, resultando em menor resistência mecânica (Al-Shayea, 2001).

Mesmo sob a consistência θ_2 , alguns tratamentos apresentaram valores de IC $\geq 2,0$ MPa (Otto et al., 2011). Ainda que a referência de Otto et al. (2011) seja dedicada

ao estudo do crescimento das raízes de cana-de-açúcar em solos minerais, também é possível observar camadas compactadas nos solos antropogênicos deste estudo, em função dos diferentes usos da terra. Além disso, pesquisas recentes também associaram a alta resistência mecânica desses solos (antropogênicos) à predominância de artefatos cerâmicos nas camadas superficiais (Soares et al., 2021). E, embora seja uma característica desses solos, os resultados deste estudo evidenciaram, adicionalmente, que os diferentes usos podem estar impactando na quantidade, na forma, ou tamanho desses fragmentos cerâmicos, o que pode estar diretamente relacionado aos resultados da resistência do solo à penetração e da CSC, nos diferentes tratamentos. O uso de implementos agrícolas no revolvimento, portanto deve estar reduzindo o tamanho desses artefatos cerâmicos em comparação a áreas manejadas tradicionalmente em quintais agroflorestais e sob mata nativa (Fig. 17). Assim, os maiores valores de IC podem estar associados à maiores quantidades e tamanhos de artefatos nas áreas de floresta (VN-TPA) e quintais agroflorestais (QA-TPA).

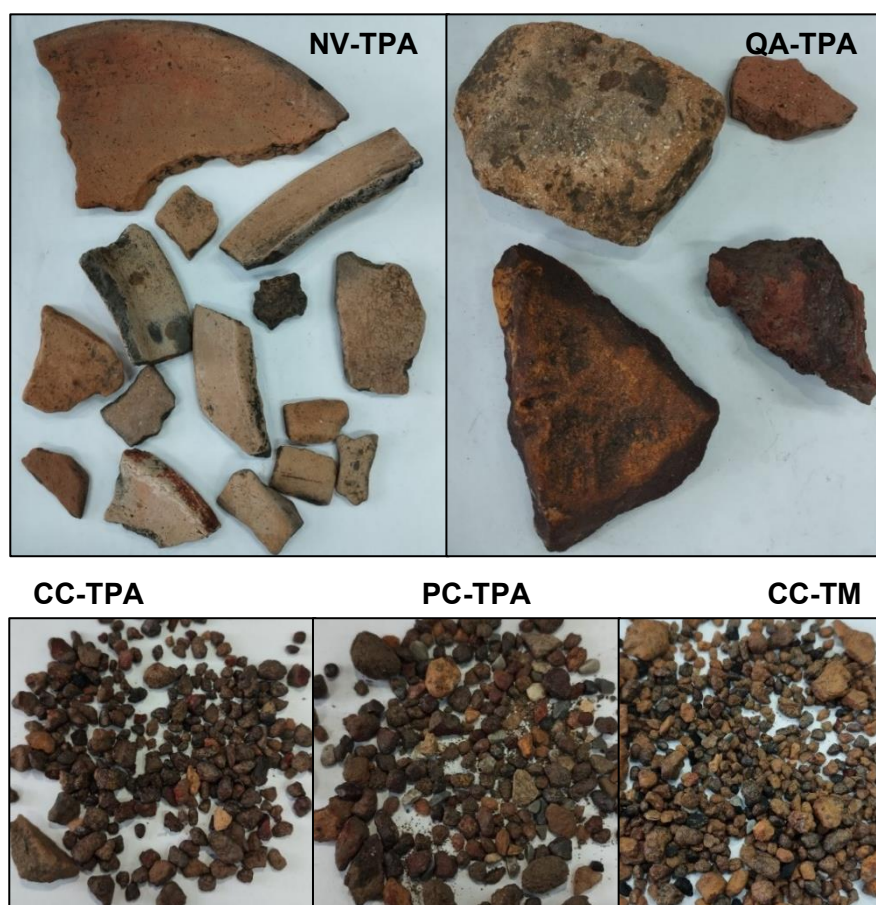


Figura 17. Fragmentos de artefatos cerâmicos de sítios antropogênicos localizados em Manacapuru, Amazonas, Brasil.

4.4 Comportamento compressivo e CSC dos solos antropogênicos sob diferentes consistências e práticas de uso e manejo

Os resultados deste estudo também indicaram que, independentemente do uso ou manejo da terra, para umidades situadas na faixa friável do solo (θ_1), as curvas de compressão apresentaram comportamentos semelhantes. As retas de compressão virgem foram próximas, sugerindo deformações similares para os níveis de carregamentos (pressão) aplicados.

Os maiores contrastes foram percebidos nas curvas de compressão secundárias, que foram responsivas a história de tensão de cada tipo de uso ou manejo. Esse padrão foi observado nas três camadas dos tratamentos QA-TPA, CC-TPA, PC-TPA e CC-TM, analisados sob as consistências friável e plástica (Fig. 9, 10, 11). Esses resultados foram semelhantes aos apresentados por Kondo, (1998); Kondo e Dias Junior, (1999b).

O estudo revela que o aumento do conteúdo de água do solo para valores acima do limite de plasticidades (θ_2) resultou em redução da pressão de préconsolidação (σ_p) e aumento do índice de compressão (m) em todos os tratamentos e camadas avaliados neste estudo (Tab. 2; Fig. 8, 9, 10, 11). Os maiores conteúdos de água em θ_2 provocou lubrificações entre as partículas do solo, diminuindo certamente a coesão e capacidade de suporte de carga (Al-Shayea, 2001). Todavia, os tratamentos com maiores teores de matéria orgânica influenciam no limite de plasticidade, uma vez que o material orgânico também apresenta capacidade de reter água, e junto com as partículas do solo pode ter diminuído a ação lubrificante da água (Braidá et al., 2006).

Esses resultados indicam, objetivamente, que a determinação do limite de plasticidade (LP) nesses solos antropogênicos fornece uma referência para o limite superior de umidade, acima do qual o solo não deve ser trabalhado, sem garantia do risco de compactação. Isso ocorre porque segundo Hillel (1982), o limite de plasticidade

marca o início da faixa de consistência plástica do solo, onde as deformações tornam-se irreversíveis e com a degradação da estrutura do solo.

Os resultados do índice de compressão (m) indicam que os tratamentos considerados mais conservacionistas, como VN-TPA e QA-TPA, apresentam maior susceptibilidade à compactação, o que se deve à ausência de história de tensão ou baixo impacto antrópico. No caso do tratamento CC-TM, apesar do histórico de práticas convencionais, a mobilização recente do solo antes da amostragem, foi responsável pelos altos valores estimados para o índice de compressão (m). Adicionalmente, o conteúdo elevado de água no solo resultou no aumento do índice de compressão em todos os tratamentos avaliados (Tab. 2).

De acordo com Smith et al. (1997) o índice de compressão é um parâmetro da curva de compressão que pode ser utilizado como indicador da susceptibilidade do solo à compactação. Os resultados desta pesquisa, portanto, são inéditos, uma vez que não se tem na literatura resultados similares ou uma abordagem que relacione o índice de compressão (m) com o impacto do uso e de práticas agrícolas sobre solos antropogênicos da Amazônia.

A ausência de significância entre os três modelos de capacidade de suporte de carga do solo (CSC) antropogênico, ajustados para a área de floresta nativa (VN-TPA), indica um comportamento homogêneo da capacidade de suporte de carga do horizonte A antrópico, reiterando a ausência de história de tensão sobre o horizonte antrópico do solo sob mata, mas também a resiliência e estabilidade estrutural em todo o horizonte, como comentado por Teixeira et al. (2009). Esses resultados, aliados às evidências da pressão de préconsolidação (σ_p) obtidas na análise univariada sob as consistências θ_1 e θ_2 (Tab. 2), são consistentes e suportam esses apontamentos.

Em um estudo pioneiro sobre a CSC de solos antropogênicos da Amazônia, Soares et al. (2021), ao pesquisarem a CSC de uma Terra Preta da Amazônia nas camadas 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, destacaram que as diferenças encontradas entre os modelos foram atribuídas principalmente às variações na densidade do solo, no conteúdo de matéria orgânica, e no índice de floculação. Iori et al. (2012) ao utilizarem a pressão de préconsolidação como ferramenta na análise da sustentabilidade estrutural de solos da bacia do rio Ribeira de Iguape, também observaram diferenças

entre os modelos de diferentes classes de solos sob mata nativa, e atribuíram esse efeito a matéria orgânica e ao índice de floculação.

Resultados semelhantes também foram apresentados por Vischi Filho et al. (2015), quando associaram os maiores valores da σ_p aos maiores valores de densidade do solo na camada 0,20 – 0,30 m de um Latossolo Vermelho agricultável.

Embora as diferenças destacadas nesses atributos sejam evidentes na análise univariada deste estudo (Tab. 2), elas não foram suficientes para gerar diferenças significativas entre os modelos de CSC das três camadas em VN-TPA, devido à baixa correlação desses atributos (D_s e COT) com a pressão de préconsolidação (σ_p). Esse comportamento é provavelmente atribuído à estabilidade da matéria orgânica nesse tipo de solo (Santos et al., 2018; Campos et al., 2011).

O aumento da CSC na camada 0,00 – 0,10 m sob a consistência friável (θ_1) refletiu o impacto do uso antrópico, já que as intervenções humanas, caracterizadas pela ocupação e pelos diferentes manejos do solo, promoveram sua compactação (Tab. 2). Resultados semelhantes foram reportados por Silva Araújo et al. (2023), que também atribuíram o aumento da CSC às mudanças no uso da terra, com impactos mais severos em sistemas de manejo com colheita mecanizada. O efeito da mecanização no aumento da resistência mecânica do solo também foi evidenciado pelos maiores valores de IC e σ_p nos tratamentos CC-TPA e CC-TM deste estudo.

O efeito da mudança de uso da terra, destacado pelos tratamentos com uso agrícola (CC-TPA, PC-TPA e CC-TM), foi evidenciado por meio da análise de variância, e complementarmente pelo método proposto por Dias Junior et al. (2005). Nesse contexto, as diferenças significativas entre esses tratamentos e o VN-TPA sob a consistência θ_1 , especialmente nas camadas 0,00 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m (Tab. 2), foram confirmadas pela modelagem da CSC, uma vez que entre 50 a 100% das amostras indeformadas apresentaram-se na região “a” do gráfico (Fig. 13a, b, c), ou seja, com ocorrência de compactação adicional. A combinação desses métodos também foi explorada por Soares et al. (2021), e permitiu a esses autores concluir que, a mudança no uso da terra em Terra Preta Arqueológica é mais severa quando a conversão é feita de florestas para pastagens.

Iori et al. (2012) ao investigarem a capacidade de suporte de carga (CSC) de solos sob diferentes usos, observaram que os maiores teores de silte e argila

determinaram uma maior CSC em um Cambissolo Háplico sob cultivo de bananeira e remanescentes de Mata Atlântica, quando comparado à CSC de um pasto degradado e de um sistema silvipastoril.

Na ausência de histórico de tensão, como ocorre nos ambientes preservados por vegetação nativa, a elevada CSC pode estar associada à coesão gerada por forças internas de natureza elétrica entre as partículas do solo. Em condições de baixa umidade (θ_1), a adesão é mínima, favorecendo a coesão; por outro lado, nas amostras com aumento da umidade (θ_2), a coesão diminui, pois, a presença de água nos interstícios tende a reduzir as forças de natureza elétrica (Emmer, 2004).

A pressão de préconsolidação é amplamente utilizada como indicador da resistência interna de solos naturais frente a práticas antrópicas, como o tráfego de máquinas, o tempo de uso e as cargas aplicadas (Sandoval et al., 2020). Essa estratégia é particularmente relevante para o monitoramento de áreas compactadas, uma vez que o tráfego intensivo de máquinas pode reduzir significativamente o crescimento radicular das culturas (Sousa et al., 2019). Por outro lado, estudos focados na análise da qualidade estrutural de ambientes preservados ou com baixo impacto antrópico também têm utilizado esse método (Iori et al., 2012). Os resultados desta pesquisa demonstram que a pressão de préconsolidação deve ser adotada como ferramenta para o monitoramento da qualidade estrutural dos solos de origem antrópica na Amazônia.

4.5 Análise multivariada como ferramenta de descrição de impactos e agrupamento de atributos físico-mecânicos e químicos de solos antropogênicos da Amazônia

Os resultados da análise de componentes principais (ACP) permitiram distinguir os impactos dos diferentes usos e manejos sobre a qualidade estrutural e COT em solos antropogênicos da Amazônia Central. O primeiro e o segundo componente principais, nas três camadas avaliadas, explicaram mais de 50% da variabilidade dos atributos físico-mecânicos e do carbono orgânico do solo, possibilitando observar o efeito dos diferentes usos e manejo nesses solos (Tab. 5). A discriminação entre os tratamentos foi associada a essas características, com o CP1 representando, principalmente, as propriedades físicas (porosidade total, argila, silte, areia, densidade das

partículas, limite de plasticidade), e carbono orgânico do solo, enquanto o CP2 esteve relacionado às propriedades mecânicas (umidade, pressão de préconsolidação, índice de cone e índice de compressão) (Tab. 5).

Os resultados e a estratégia de análise a partir de componentes principais para compreender os impactos causados pela mudança de uso da terra sobre os atributos dos solos de origem natural, bem como aqueles antropogênicos, se junta a iniciativa de outros estudos como o de Brito et al., (2020); Cunha et al. (2017); Frozzi et al. (2020), compromissados com a qualidade e conservação dos recursos naturais da região amazônica.

5 CONCLUSÕES

A substituição de floresta nativa para sistemas agrícolas, sobretudo aqueles caracterizados por manejo convencional e mecanização intensiva, promoveu alterações significativas nos atributos físicos e mecânicos do solo. Em contrapartida, sistemas tradicionais de manejo, como os quintais agroflorestais, causaram impactos menos pronunciados, preservando parcialmente a qualidade estrutural dos solos.

A resistência ao cisalhamento revelou-se sensível aos efeitos das práticas de uso e manejo em solos antropogênicos, podendo, adicionalmente, contribuir para estudos sobre a sustentabilidade da estrutura dos Antrossolos amazônicos.

A pressão de préconsolidação (σ_p) mostrou-se responsiva à mudança de uso da terra, indicando maior compactação em áreas com uso intensivo e mecanizado, especialmente na camada superficial (0,00 – 0,10 m). O índice de compressão (m) destacou-se como um indicador relevante da susceptibilidade à compactação, com os maiores valores observados em solos sob vegetação nativa (VN-TPA) e quintais agroflorestais (QA-TPA), indicando maior susceptibilidade estrutural nesses tratamentos. Já o índice de cone (IC) indicou maior resistência mecânica em solos sob sistemas convencionais, refletindo os efeitos cumulativos do manejo e da mudança de uso da terra.

Os resultados também revelaram uma forte relação entre os atributos físico-mecânicos e o teor de carbono orgânico total (COT), com reduções significativas de COT nas áreas com monocultivo e preparo convencional. Este achado enfatiza o

papel do manejo tradicional em manter a qualidade química e estrutural do solo, destacando a importância de práticas sustentáveis para preservar a qualidade desses pedoambientes únicos.

Este estudo reforça a necessidade de políticas que promovam o manejo adequado de solos antropogênicos na Amazônia, especialmente frente à expansão da agricultura mecanizada. O uso de indicadores físico-mecânicos, como RC, σ_p , m e IC, foi essencial para avaliar a qualidade estrutural e a resiliência do solo frente às práticas antrópicas em diferentes níveis de consistências. Por fim, destaca-se a relevância de continuar explorando o impacto de diferentes manejos sobre a função estrutural desses solos, visando estabelecer estratégias de uso e manejo sustentáveis que assegurem a conservação dos recursos edáficos da Amazônia.

REFERÊNCIAS

- AL-SHAYEA NA (2001) The combined effect of clay and moisture content on the behavior of remolded unsaturated soils. **Engineering Geology**, 62(4), 319–342. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00032-1)
- ALVARES CA, STAPE JL, SENTELHAS PC, DE MORAES GONÇALVES JL, SPAROVEK G (2013) Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift** 22, 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ASSEFA D, REWALD B, SANDÉN H, ROSINGER C, ABIYU A, YITAFERU B, GODBOLD DL (2017) Deforestation and land use strongly effect soil organic carbon and nitrogen stock in Northwest Ethiopia. **Catena (Amst)** 153, 89–99. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.02.003>
- AWE GO, REICHERT JM, FONTANELA E (2020) Sugarcane production in the subtropics: Seasonal changes in soil properties and crop yield in no-tillage, inverting and minimum tillage. **Soil Tillage Res** 196, 104447. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104447>
- AZEVEDO MAA (1999) Contribuição ao estudo geotécnico de solos de Viçosa – MG. Viçosa, MG, **Universidade Federal de Viçosa**, 169p. (Dissertação de Mestrado)
- BARBOSA RCM, TEIXEIRA WG (2003) Caracterização granulométrica e da densidade de partículas em amostras de Terra Preta de Índio In: **Anais do VIII Simpósio de Geologia da Amazônia**, Manaus, AM.
- BARROS TRM, LIMA HV, DE RODRIGUES S, KERN DC (2016) Distribution of textural and structural porosity in soils of Archaeological Dark Earth. **REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA** 47. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20160073>

BATISTÃO AC, HOLTHUSEN D, REICHERT JM, SANTOS LAC, DOS CAMPOS MCC (2020) Resilience and microstructural resistance of Archaeological Dark Earths with different soil organic carbon contents in Western Amazonia, Brazil. **Geoderma** 363, 114130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114130>

BIELUCZYK W, MERLOTI LF, CHERUBIN MR, MENDES LW, BENDASSOLLI JA, RODRIGUES RR, CAMARGO PB, DE VAN DER, PUTTEN WH, TSAI SM (2023) Forest restoration rehabilitates soil multifunctionality in riparian zones of sugarcane production landscapes. **Science of The Total Environment** 888, 164175. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164175>

BLANCO-CANQUI H (2017) Biochar and Soil Physical Properties. **Soil Science Society of America Journal** 81, 687. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>

BOCHNER JK (2007) Serviços ambientais gerados pela floresta de mata Atlântica na qualidade do solo. Seropédica, **Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro**, 45p. (monografia)

BRAIDA JA, REICHERT JM, VEIGA M, REINERT DJ (2006) Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. **Rev. Bras. Ciência do Solo** 30, 605–614. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400001>

BRITO WBM, CAMPOS MCC, DE BRITO FILHO EG, DE LIMA AFL, CUNHA JM, DA SILVA LI, DOS SANTOS LAC, MANTOVANELLI BC (2020) Dynamics and spatial aspects of erodibility in Indian Black Earth in the Amazon, Brazil. **Catena (Amst)** 185, 104281. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104281>

BRITO WBM, COSTA CAMPOS MC, CAMPOS MANTOVANELLI B, DA CUNHA JM, FRANCISCON U, RODRIGUES SOARES MD (2018) Spatial variability of soil physical properties in Archeological Dark Earths under different uses in southern Amazon. **Soil Tillage Res** 182, 103–111. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.05.008>

CAMPOS BC, REINERT DJ, NICLODI R, RUEDELL J, PETRELE C (1995) Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo do solo. **R. Ci. Solo**, 19:112-126.

CAMPOS MCC, RIBEIRO MR, SOUZA JÚNIOR VS, RIBEIRO FILHO MR, SOUZA RVCC, ALMEIDA MC (2011) Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. **Bragantia** 70, 598–609. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000300016>

CARVALHO MAC, PANOSSO AR, RIBEIRO TEIXEIRA EE, ARAÚJO EG, BRANCAGLIONI VA, DALLACORT R (2018) Multivariate approach of soil attributes on the characterization of land use in the southern Brazilian Amazon. **Soil Tillage Res** 184, 207–215. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.004>

CHERUBIN MR, KARLEN DL, FRANCO ALC, TORMENA CA, CERRI CEP, DAVIES CA, CERRI CC (2016) Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma** 267, 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>

CUNHA JM, CAMPOS MCC, GAIO DC, DE SOUZA ZM, SOARES MDR, DA SILVA DMP, SIMÕES EL (2018) Spatial variability of soil respiration in Archaeological Dark Earth areas in the Amazon. **Catena (Amst)** 162, 148–156. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.001>

CUNHA JM, GAIO DC, COSTA CAMPOS MC, RODRIGUES SOARES MD, PINHEIRO DA SILVA DM, LEITE DE LIMA AF (2017) Atributos físicos e estoque de carbono do solo em áreas de Terra Preta Arqueológica da Amazônia. *Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 12, 263. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1890>

DEPERON JÚNIOR MAH, NAGAHAMA J, OLSZEWSKI N, CORTEZ JW, DE SOUZA B (2016) Influência de implementos de preparo e de níveis de compactação sobre atributos físicos do solo e aspectos agrônômicos da cultura do milho. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering** 36, 367–376. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1590/1809-4430>

DIAS JUNIOR MS, LEITE FP, LASMAR JÚNIOR E, ARAÚJO JUNIOR CF (2005) Traffic effects on the soil preconsolidation pressure due to eucalyptus harvest operations. **Sci Agric** 62, 248–255. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162005000300008>

DIAS JUNIOR MS, PIERCE FJ (1995) A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology** 8, 139–151. [https://doi.org/10.1016/0933-3630\(95\)00015-8](https://doi.org/10.1016/0933-3630(95)00015-8)

DIAS JUNIOR MS, PIERCE FJ (1996) O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Rev. Bras. Ciência do Solo** 20, 175–182.

DIAS JUNIOR MS, SILVA AR, FONSECA S, LEITE FP (2004) Método alternativo de avaliação da pressão de preconsolidação por meio de um penetrômetro. **R. Bras.Ci. Solo**, 28:805-810.

EMMER R (2004) Implantação do campo experimental de Engenharia Geotécnica da UFSM. Santa Maria, **Universidade Federal de Santa Maria**, 191p. (Dissertação de Mestrado).

ESTEBAN DAA, DE SOUZA ZM, DA SILVA RB, DE SOUZA LIMA E, LOVERA LH, DE OLIVEIRA IN (2020) Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. **Geoderma** 362, 114097. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>

FALCÃO N, MOREIRA A, COMENFORD NB (2009) A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia central. **As Terras Pretas de Índio Da Amazônia: Sua Caracterização e Uso Deste Conhecimento Na Criação de Novas Áreas**, 189–200. http://www.biochar.org/joomla/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=5&Itemid=8

FERREIRA EB, CAVALCANTI PP, NOGUEIRA DA (2021) _ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues)_. **R package version 1.2.2**, <<https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>>.

FROZZI JC, DA CUNHA JM, CAMPOS MCC, BERGAMIN AC, BRITO WBM, FRANCISCON U, DA SILVA DMP, DE LIMA AFL, DE BRITO FILHO EG (2020) Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. **Environmental Earth Sciences**, 79(11), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08948-x>

GERVAZIO W, YAMASHITA OM, ROBOREDO D, BERGAMASCO SMPP, FELITO RA (2022) Quintais agroflorestais urbanos no sul da Amazônia: os guardiões da agrobiodiversidade? **Ciência Florestal** 32, 163–186. <https://doi.org/10.5902/1980509843611>

GITHINJI L (2014) Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. **Arch Agron Soil Sci** 60, 457–470. <https://doi.org/10.1080/03650340.2013.821698>

GONZÁLEZ OF BAQUERO-ECHEVERRI S CAICEDO-GARCÍA JP LOAIZA-USUGA JC POLANÍA J (2024) Soil quality: an indicator of recovery in a nature reserve in the Colombian Andes. **Agroforestry Systems**. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00951-y>

HILLEL D (1982) Introduction to soil physics. San Diego, **Academic Press**, 365p.
IORI P, SILVA RB, DA DIAS JÚNIOR M, DE S LIMA JM (2012) Pressão de preconsoidação como ferramenta de análise da sustentabilidade estrutural de classes de solos com diferentes usos. **Rev Bras Cienc Solo** 36, 1448–1456. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500008>

IUSS WORKING GROUP WRB, (2014) World reference base for soil resources 2014: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. **FAO**.

JASTROW JD, MILLER RM, LUSSENHOP J (1998) Contributions of interacting biological mechanisms to soil aggregate stabilization in restored prairie. **Soil Biol. Biochem.**, 30:905-916.

KAISER HF (1960) The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. **Educ Psychol Meas** 20, 141–151. <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>

KASSAMBARA A, MUNDT F (2020) `_factoextra`: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses_. **R package version 1.0.7**, <<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>>.

KIM JS, SPAROVEK G, LONGO RM, DE MELO WJ, CROWLEY D (2007) Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 39, n. 2, p. 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.010>

KONDO MK (1998) Compressibilidade de três Latossolos sob diferentes usos. Lavras, **Universidade Federal de Lavras**, 105p. (Dissertação de Mestrado)

KONDO MK, DIAS JUNIOR MS, (1999a) Efeito do manejo e da umidade no comportamento compressivo de três Latossolos. **Rev Bras Cienc Solo** 23, 497–506.

KONDO MK, DIAS JUNIOR MS, (1999b) Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Rev Bras Cienc Solo** 23, 211–218.

LAL R (1999) Métodos para a avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos. Jaguariúna, **Embrapa Meio Ambiente**, 97p. (Embrapa Meio Ambiente. Documentos, 3)

LIMA HN, SCHAEFER CER, MELLO JWV, GILKES RJ, KER JC (2002) Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian black earth”) of Western Amazonia. **Geoderma** 110, 1–17. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00141-6](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00141-6)

LOMBARDO, et al. (2022) Evidence confirms an anthropic origin of Terra Preta Amazônicas. **Nat Commun** 13, 3444. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31064-2>

LULL HW (1959) Soil compaction on forest and range lands. Washington, **Forest Service United States Department of Agriculture**, 33p. (Miscellaneous Publication, 768)

NASCIMENTO WB, DE SOUZA TAF, SILVA JJC, MANTOVANELLI BC, OLIVEIRA IA, DE OLIVEIRA ARAUJO W, CAMPOS MCC, DE OLIVEIRA FP (2024) Physical–chemical characterization of Terra Preta Amazônica as influenced by tropical fruticulture in western Brazil’s Legal Amazon. **J Soils Sediments** 24, 2938–2947. <https://doi.org/10.1007/s11368-024-03757-2>

NELSON DW, SOMMERS LE (1996) Total Carbon, Organic Carbon, and Organic Matter. In D.L. Sparks et al. (Eds.), *Methods of Soil Analysis: Part 3—Chemical Methods* (pp. 961–1010). Madison, WI: **Soil Science Society of America and American Society of Agronomy**. SSSA Book Series No. 5.

NEVES JUNIOR AF (2008) Qualidade física de solos com horizonte antrópico (Terra Preta de Índio) na Amazônia Central, p.93, **Esalq**, (Tese de Doutorado)

OLIVOTO T, LÚCIO AD (2020) “metan: An R package for multi-environment trial analysis.” **Methods in Ecology and Evolution**, *11*(6), 783-789. doi:10.1111/2041-210X.13384

OTTO R, SILVA AP, FRANCO HCJ, OLIVEIRA ECA, TRIVELIN PCO (2011) High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil Tillage Res** 117, 201–210. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.005>

R CORE TEAM (2023) **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.

RADFORD BJ, BRIDGE BJ, DAVIS RJ, McGARRY D, PILLAI UP, RICKMAN JF, WALSH PA, YULE DF (2000) Changes in the properties of a vertisol and responses of wheat after compaction with harvest traffic. **Soil Till. Res.**, 54:155-170.

RAMALHO B, DIECKOW J, DE FREITAS MELO V, GARDNER BROWN G, LUZIA SIMON P, ALVES IBARR M, CUNHA L, KILLE P (2022) Carbon and nitrogen storage and stability by mineral-organic association in physical fractions of anthropogenic dark earth and of reference soils in Amazonia. **Catena (Amst)** 213, 106185. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2022.106185>

REYNOLDS WD, BOWMAN BT, DRURY CF, TAN CS, LU X (2002) Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma** 110, 131–146. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00228-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00228-8)

RIBEIRO HMS, NEVES JR AF, OLIVEIRA DM, DE FERRERIA JAN, SILVA RB, DA ROSÁRIO BC, DO HOFFMANN RB, SILVA FAM, FALCÃO NPS (2022) Biochar After Thirteen Years of Agricultural Crops on the Physical Attributes and Organic Carbon of a Yellow Oxisol in Central Amazon. **Journal of Agricultural Science** 14, 88. <https://doi.org/10.5539/jas.v14n5p88>

RIBEIRO HMS, SILVA FAM, PINTO RB, FALCÃO NPS, SILVA RB (2023) Indicadores de qualidade e ocorrência de solos antropogênicos na Amazônia central: uma revisão sistemática. **Revista de biologia e ciências da terra**, v. 23, n. 1, p. 89–104.

ROBBINS DH, JOHNSON Jr. CE, SHAFER RL (1988) Modeling soil-metal sliding resistance. St. Joseph, **ASAE**, p.108-110. (ASAE Paper)

ROCHA WW, DIAS J, LIMA JM, MIRANDA EEV, SILVA AR (2002) Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG). **Rev Bras Cienc Solo** 26, 297–303.

RODRIGUES et al. (2021) Systematic review of soil ecosystem services in tropical regions. **Royal Society Open Science**, v. 8, n. 3, p. rsos.201584. <https://doi/10.1098/rsos.201584>

ROSTAIN S, MCKEY D (2023) Historical Ecology in Amazonia. In: COLONESE AC, MILHEIRA RG (eds) Historical Ecology and Landscape Archaeology in Lowland South America. Interdisciplinary Contributions to Archaeology. **Springer**, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32284-6_4

SANDOVAL FHB, DE SOUZA ZM, LIMA ES, DA SILVA RB, DE OLIVEIRA IN ESTEBAN DAA, LOVERA LH (2020) Structural quality and load-bearing capacity of an ultisol (Argissolo vermelho amarelo) in mechanized coffee areas with different deployment times. **Rev Bras Cienc Solo** 44. <https://doi.org/10.36783/18069657rbcs20190009>

SANTOS LAC, DOS ARAUJO JKS, SOUZA JÚNIOR VS, DE CAMPOS MCC, CORRÊA MM, SOUZA RAS (2018) Pedogenesis in an Archaeological Dark Earth – Mulatto Earth Catena over Volcanic Rocks in Western Amazonia, Brazil. **Rev Bras Cienc Solo** 42, 170359. <https://doi.org/10.1590/18069657RBCS20170359>

SANTOS, LAC, CAMPOS, MCC, DE AQUINO, RE, BERGAMIN, AC, DA SILVA, DMP, MARQUES JUNIOR, J, FRANÇA, ABC, (2013) Caracterização de terras pretas arqueológicas no sul do estado do Amazonas. **Rev Bras Cienc Solo** 37, 825–836. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400001>

SHELLEKENS J, ALMEIDA-SANTOS T, MACEDO RS, BUURMAN P, KUYPER TW, VIDAL-TORRADO P (2017) Molecular composition of several soil organic matter fractions from anthropogenic black soils (Terra Preta de Índio) in Amazonia — A pyrolysis-GC/MS study. **Geoderma** 288, 154–165. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.001>

SEBASTIAN J, JULIE H, FRANÇOIS (2008) FactoMineR: an R package for multivariate analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p. 1–18. DOI: 10.18637/jss.v025.i01

SIGMAPLOT (2007) Scientific Graphing Software: versão 11.0. **San Rafael: Hearne Scientific Software**.

SILVA AP; LANÇAS KP (2006) Desenvolvimento de um equipamento para determinação da resistência ao cisalhamento do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 30(6), 983–990.

SILVA ARAÚJO F, MENEZES DE SOUZA Z, SOARES SOUZA G, BARBOZA DA SILVA R, AGUILERA ESTEBAN DA MORAES TAVARES RL (2023) Load-Bearing Capacity of an Oxisol under Burned and Mechanized Harvest Sugarcane Crops. **Sustainability** 15, 15185. <https://doi.org/10.3390/su152115185>

SILVA RB, DA MASQUETO BJ, LANÇAS KP, SILVA FAM (2015) DESENVOLVIMENTO, AUTOMAÇÃO E DESEMPENHO DE UM CONSOLIDÔMETRO COM INTERFACE HOMEM-MÁQUINA. **Rev Bras Cienc Solo** 39, 416–427. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140435>

SILVA RB, DIAS JUNIOR MS, SANTOS FL, B FRANZ CA (2004) Resistência ao cisalhamento de um Latossolo sob diferentes uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 28, 165–173.

SILVA RB, DIAS JUNIOR MS, SILVA FAM, FOLE SM (2003) O TRÁFEGO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS E AS PROPRIEDADES FÍSICAS, HÍDRICAS E MECÂNICAS DE UM LATOSSOLO DOS CERRADOS. **Rev Bras Cienc Solo** 27, 973–983.

SILVA RB, IORI P, SILVA FAM, DIAS JÚNIOR, MS (2010) Modelagem e determinação do estado crítico de consolidação a partir da relação massa e volume em solos canavieiros. **R. Ci. Agrar.**, 33:376-389.

SILVA, R.B., IORI, P., TAVARES, R.L.M., DE SOUZA, Z.M., DE LIMA, C.C., DE MELO SILVA, F.A., DE SOUZA BENTO, M., (2022) Do water dynamics and land use in riparian areas change the spatial pattern of physical–mechanical properties of a Cambisol? *Precis Agric* 23, 984–1007. <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09871-2>

SMITH CW, JOHNSTON MA, LORENTZ' S (1997) Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil Tillage Res** 41, 53–73.

SMITH NJF (1980) Anthrosols and human carrying capacity in Amazônia *Annals of the Association of American Geographers*, 70, p.553.

SNEDECOR GW, COCHARAN WG (1989) Statistical methods, 8. Ed. **Ame.** ed. Iowa. SOARES MDR, CAMPOS MCC, CUNHA JM, WECKNER FC, BRITO FILHO, MANTOVANELI BC, LEITE AFL (2018) Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia** 12, 125–133. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOARES MDR, DE SOUZA ZM, CAMPOS MCC, DA SILVA RB, ESTEBAN DAA, NORONHA RL, DOS SANTOS GOMES MG, DA CUNHA JM (2021) Land-use change and its impact on physical and mechanical properties of Archaeological Black Earth in the Amazon rainforest. **Catena (Amst)** 202, 105266. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105266>

SOMBROEK W, RUIVO MDL, FEARNside PM, GLASER B, LEHMANN J (2006) Terra Preta Amazônicas as Carbon Stores and Sinks, in: *Terra Preta Amazônicas*. **Kluwer Academic Publishers**, Dordrecht, pp. 125–139. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_7

SOUSA ACM, FARHATE CVV, DE SOUZA ZM, TORRES JLR, DA SILVA RB, (2019) Soil Load-Bearing Capacity and Development of Root System in Area Under Sugarcane with Traffic Control in Brazil. **Sugar Tech** 21, 153–161. <https://doi.org/10.1007/s12355-018-0636-9>

STAFFORD JV; TANNER DW (1976) The frictional characteristics of steel sliding on soil. Silsoe, **National Institute of Agricultural Engineering**, p.109-114. (NIAE Department Note n. DN/T/728/1162)

STONE RJ; EKWUE EI (1993) Maximum bulk density achieved during soil compaction as affected by the incorporation of three organic materials. Trans. Am. **Soc. Agric. Eng.**, 36:1713-1719.

TAYLOR DW (1948) Fundamentals of soil mechanics. New York, John Wiley, 770p.
TEIXEIRA PC, DONAGEMMA GK, FONTANA A, TEIXEIRA WG (2017) **Manual e Métodos de Análise de Solo**, 3a edição. ed. Brasília.

TEIXEIRA WG, MARTINS GC, COELHO MR, MARTINS JS, SHINZATO E (2005) As Terras Pretas de Índio no Distrito Agropecuário da Suframa. **Suframa**. Manaus, p.1-13.

TEIXEIRA WG, MARTINS GC, MACEDO RS, NEVES JUNIOR AF, MOREIRA A, BENITES VM, STEINER C (2009) As propriedades físicas e hídricas dos horizontes antrópicos das Terras Pretas de Índio na Amazônia Central. In: TEIXEIRA WG, KERN DC, MADARI BE, LIMA HN, WOODS W (Eds) As terras pretas de índio da Amazônia: sua caracterização e uso deste conhecimento na criação de novas áreas. Manaus: **Embrapa Amazônia Ocidental**. p. 242-250.

TEIXEIRA WG; MARTINS GC (2003) Soil physical characterization. In: LEHMANN J, KERN DC, GLASSER B, WOODS WI (Eds.) **Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management**. Kluwer Academic Publishers, Netherlands, pp. 271–286.

TERZAGHI K, PECK RB, MESRI G (1996) Soil mechanics in engineering practice. 3.ed. New York, **John Wiley & Sons**, 549p.

TISDALL JM; OADES JM (1982) Organic matter and water stable aggregates in soils. **J. Soil Sci.**, 33:141-163.

TRINDADE AV, BORGES AL, TEIXEIRA AH, MATOS AP (2004) **O cultivo da banana**. Cruz das Almas BA.

USDA (2017) United States Department of Agriculture. Soil Science Division Staff. Soil Survey Manual; Ditzler, C., Scheffe, K., Monger, H.C., Eds.; **USDA Handbook 18**; Government Printing Office: Washington, DC, USA.

USOWICZ B, LIPIEC J, ŁUKOWSKI M, MARCZEWSKI W, USOWICZ J (2016) The effect of biochar application on thermal properties and albedo of loess soil under grassland and fallow. **Soil Tillage Res** 164, 45–51.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2016.03.009>

VASCONCELOS RFB, CANTALICE JRB, DA SILVA AJN, DE OLIVEIRA VS, DA SILVA YJAB (2010) Limites de consistência e propriedades químicas de um Latossolo Amarelo distrocoeso sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Rev Bras Cienc Solo** 34, 639–648.

VENABLES WN, RIPLEY BD (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. **Springer**, New York. ISBN 0-387-95457-0

VISCHI FILHO, OSWALDO JOSÉ; LANÇAS, KLAUS PAULO; DIAS JÚNIOR, MOACIR DE SOUZA (2015) Capacidade de suporte de carga e desenvolvimento do sistema radicular em Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de tráfego de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1149–1158, DOI: 10.1590/01000683rbcs20140617

WICKHAM H, et al. (2019) “Welcome to the tidyverse.” **Journal of Open Source Software**, 43, 1686. doi:10.21105/joss.01686 <<https://doi.org/10.21105/joss.01686>>. WISEMAN CLS, PÜTTMANN W (2006) Interactions between mineral phases in the preservation of soil organic matter. **Geoderma** 134, 109–118. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.09.001>

YAO Y; ZENG D (1988) Investigation on the relationship between sliding speed and soil-metal friction. Trans. **Chinese Soc. Agric.**, 19:33-40.

ZANINETTI RA, MOREIRA A, MORAES LAC (2016) Atributos físicos, químicos e biológicos de Latossolo Amarelo na conversão de floresta primária para seringueiras na Amazônia. **Pesqui Agropecu Bras** 51, 1061–1068. <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900005>