

**Biomassa microbiana como bioindicador da qualidade do solo  
em agroflorestas cacauíferas e vegetações secundárias na  
Amazônia brasileira**

**Soil microbial biomass as a bioindicator of soil quality in cacao  
agroforestry systems and secondary vegetation in the Brasilian  
Amazon**

**Biomasa microbiana como bioindicador de la calidad del suelo  
en agroforestería cacaotera y vegetación secundarios de la  
Amazonía brasileña**

DOI: 10.54033/cadpedv23n1-044

Originals received: 12/5/2025  
Acceptance for publication: 12/30/2025

---

**Taoramoio Neto Cicreta**

Doutorando em Biodiversidade e Biotecnologia  
Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)  
Endereço: Belém, Pará, Brasil  
E-mail: taoramoio.cicreta@icb.ufpa.br

**Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo**

Doutora em Agronomia  
Instituição: Universidade Federal de Viçosa (UFV)  
Endereço: Viçosa, Minas Gerais, Brasil  
E-mail: ruivo@museu-goeldi.br

**Michelliny Pinheiro de Matos Bentes**

Doutora em Ciência Florestal  
Instituição: Universidade Federal de Viçosa (UFV)  
Endereço: Viçosa, Minas Gerais, Brasil  
E-mail: michelliny.bentes@embrapa.br

**Aldair de Souza Medeiros**

Doutor em Agronomia  
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)  
Endereço: Chapadinha, Maranhão, Brasil  
E-mail: aldair.medeiros@ufma.br

**Moisés Mourão Jr.**

Doutor em Geografia, Planejamento Urbano e Territorial  
Instituição: Université Sorbonne Nouvelle – Paris 3  
Endereço: Paris, France  
E-mail: mmouraojr@gmail.com

**Braian Saimon Frota da Silva**

Doutor em Físico-Química

Instituição: Universidade Federal do Pará (UFPA)

Endereço: Belém, Pará, Brasil

E-mail: braiansaimon@yahoo.com.br

**Israel Alves de Oliveira**

Mestre em Agronomia

Instituição: Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA)

Endereço: Belém, Pará, Brasil

E-mail: Israelo@yahoo.com.br

**Osvaldo Ryohei Kato**

Doutor em Agricultura Tropical

Instituição: Universitat Goettingen

Endereço: Baixa Saxônia, Alemanha

E-mail: kato.embrapa@gmail.com

---

**RESUMO**

Os Sistemas Agroflorestais com Cacau (SAFCs) e vegetações secundárias (VS) amazônicas desempenham papel crucial na recuperação de solos degradados por meio da biomassa microbiana do solo (BMS), que regula a ciclagem de nutrientes e a qualidade biológica. O objetivo foi avaliar a BMS, por via carbono microbiano (MBC), nitrogênio microbiano (MBN) e razão C:N<sub>mic</sub>, como indicador da qualidade biológica em SAFCs de diferentes idades e VS em estágios sucessionais distintos, no estado do Pará. Amostras de solo coletadas em quatro profundidades foram analisadas quanto a textura, pH e BMS (por irradiação-extrAÇÃO), com testes univariadas, correlação de Spearman e Análise de Componentes Principais (PCA). O uso do solo influenciou significativamente MBC e MBN ( $\rho \leq 0,05$ ), com valores máximos de  $1.885,24 \pm 393,49 \text{ mg C kg}^{-1}$  para MBC e  $48,46 \pm 1,96 \text{ mg N kg}^{-1}$  para MBN. SAFCs mais antigos e VS na fase de estabilização apresentaram maiores teores, especialmente em solos mais argilosos com pH elevado. A razão C:N<sub>mic</sub> variou de  $5,52 \pm 0,14$  a  $104,22 \pm 22,90$ , refletindo diferenças na qualidade da matéria orgânica do solo (MOS) e eficiência microbiana. A PCA revelou separações edáficas claras entre regiões, associando maiores MBC e MBN a texturas argilosas. Conclui-se que SAFCs orgânicos bem manejados e maduros podem igualar ou superar a qualidade biológica de VS avançadas, sendo MBC, MBN e C:N<sub>mic</sub> indicadores sensíveis e eficazes para monitorar trajetórias sucessionais e orientar estratégias de manejo e restauração dos solos amazônicos.

**Palavras-chave:** Amazônia. Biomassa Microbiana. Matéria Orgânica. Qualidade do Solo. Restauração Ecológica.

**ABSTRACT**

Cocoa agroforestry systems (CAFS) and secondary vegetation (SV) in the Amazon play a critical role in recovering degraded soils through soil microbial

biomass (SMB), which regulates nutrient cycling and biological soil quality. This study evaluated SMB, using microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN), and the microbial C: N ration ( $C:N_{micr}$ ), as indicators of biological soil quality in CAFS of different ages and SV at various successional stages in Pará, Brazil. Soil samples collected at four depths were analyzed for texture, pH, and SMB via irradiation- extraction, with univariate tests, Spearman's correlation, and Principal Component Analysis (PCA). Land use significantly influenced MBC and MBN ( $p \leq 0,05$ ), with maximum values of  $1.885,24 \pm 393,49 \text{ mg C kg}^{-1}$  for MBC and  $48,46 \pm 1,96 \text{ mg N kg}^{-1}$  for MBN. Older CAFS and SV in the stabilization phase showed higher levels, especially in clay-rich soils with elevated pH. The  $C:N_{micr}$  ranged from  $5,52 \pm 0,14$  to  $104,22 \pm 22,90$ , reflecting variations in soil organic matter (SOM) quality and microbial efficiency. PCA clearly distinguished edaphic patterns between regions, associating higher MBC and MBN with clayey textures. Well managed, mature organic CAFS can match or surpass the biological soil quality in advance SV, providing successional trajectories to guide soil management and restoration strategies in the Amazon.

**Keywords:** Amazon. Microbial Biomass. Organic Matter. Soil Quality. Ecological Restoration.

## RESUMEN

Los Sistemas Agroforestales con Cacao (SAFC) y vegetaciones secundarias (VS) amazónicas desempeñan un papel crucial en la recuperación de suelos degradados mediante la biomasa microbiana del suelo (BMS), que regula la ciclagem de nutrientes y la calidad biológica. Este estudio evaluó la BMS, a través del carbono microbiano (MBC), nitrógeno microbiano (MBN) y razón  $C:N_{micr}$ , como indicadores de calidad biológica en SAFC de diferentes edades y VS en estados sucesionales distintos, en Pará, Brasil. Se recolectaron muestras de suelo a cuatro profundidades y se analizaron textura, pH y BMS (por irradiación-extracción), junto con pruebas univariadas, correlación de Spearman y Análisis de Componentes Principales (PCA). El uso del suelo influyó significativamente en MBC y el MBN ( $p \leq 0,05$ ), con valores máximos de  $1.885,24 \pm 393,49 \text{ mg C kg}^{-1}$  para MBC y  $48,46 \pm 1,96 \text{ mg N kg}^{-1}$  para MBN. SAFC más antiguos y VS en fase de estabilización presentaron mayores contenidos, especialmente en suelos más arcillosos con pH elevado. La razón  $C:N_{micr}$  varió de  $5,52 \pm 0,14$  a  $104,22 \pm 22,90$ , reflejando diferencias en la calidad de la materia orgánica del suelo (MOS) y eficiencia microbiana. El PCA evidenció separaciones edáficas claras entre regiones, asociando mayores valores de MBC y MBN a texturas arcillosas. SAFC orgánicos bien manejados y maduros igualan o superan la calidad biológica de VS avanzadas, siendo MBC, MBN y  $C:N_{micr}$  indicadores sensibles y eficaces para monitorear trayectoria sucesional y guiar estrategias de restauración amazónica.

**Palabras clave:** Amazonía. Biomasa Microbiana. Materia Orgánica. Calidad del Suelo. Restauración Ecológica.

## 1 INTRODUÇÃO

A Amazônia desempenha um papel crucial na regulação climática global e na manutenção dos regimes de precipitação da América do Sul, pois alterações em sua cobertura florestal influenciam ciclos hidrológicos e biogeoquímicos (Leite-Filho *et al.*, 2021; Lovejoy; Nobre, 2019). Nesse contexto, a conversão de florestas em pastagens e a expansão agrícola impulsionada por commodities como o cacau degradam solos tropicais, comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas e serviços ambientais essenciais às populações locais (Barros *et al.*, 2021).

O solo, sistema vivo e dinâmico, composto por matéria orgânica do solo (MOS), microrganismos e partículas minerais, responde de forma sensível às mudanças no uso e manejo da terra (Dazzi; Lo Papa, 2022; Javed *et al.*, 2022). A biomassa microbiana do solo (BMS), embora represente apenas uma pequena fração do carbono e nitrogênio totais do solo (1% a 5%), exerce papel essencial na decomposição da MOS, na ciclagem de nutrientes e na manutenção da atividade biológica (Junior; Mendes, 2007). Além disso, é considerada um importante indicador da qualidade do solo, pois responde de forma sensível às práticas de manejo e está relacionada aos teores de carbono orgânico do solo (COS) (Bastida *et al.*, 2021).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) integram espécies arbóreas perenes com culturas agrícolas e/ ou animais, promovendo interações ecológicas e econômicas entre seus componentes (Moraes *et al.*, 2011), que elevam os estoques de MOS, COS e a BMS, além de melhorar a fertilidade química e biológica do solo e mitigar os efeitos das mudanças climáticas (Asigbaase *et al.*, 2021).

Neste contexto, os sistemas agroflorestais com cacau (SAFCs) orgânicos surgem como alternativa agroecológico sustentável, promovendo o acúmulo de MOS e a fertilidade do solo, contribuindo para a sustentabilidade da agricultura familiar e a biodiversidade edáfica (Faradilla *et al.*, 2020). A serapilheira acumulada nestes sistemas desempenha função relevante ao reciclar nutrientes,

estimular a biodiversidade e equilibrar a macrofauna e microbiota do solo, favorecendo a recuperação de áreas degradadas (Vanhove *et al.*, 2016).

Apesar de seus benefícios, ainda são escassos os estudos que quantificam os efeitos de diferentes estágios sucessionais e idades dos SAFCs, bem como de vegetações secundárias (VS), sobre indicadores da qualidade biológica do solo. Diante desse cenário, investigar o desempenho ecológico, produtivo e social dos SAFCs, com base em indicadores como carbono e nitrogênio da biomassa microbiana do solo (MBC e MBN), torna-se essencial para subsidiar estratégias sustentáveis de uso e manejo da terra na Amazônia.

Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a BMS, por meio da quantificação do MBC, MBN e da razão C:N<sub>mic</sub>, como indicadores da qualidade biológica do solo em SAFCs com diferentes idades (12 a 28 anos) e vegetações secundárias em estágios sucessionais distintos (25 e 28 anos), no município de Tomé-Açu (TA) e Região Transamazônica (RT), na Amazônia brasileira.

## 2 MATERIAL E MÉTODO

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida na Amazônia legal (Pará), em 10 Sistemas Agroflorestais com Cacau (SAFCs) e duas áreas de vegetação secundárias (VS) distribuídas nos municípios de Tomé-Açu (TA) e da Região Transamazônica (RT) ( $2^{\circ}05'$  e  $3^{\circ}28'$  S e  $47^{\circ}55'$  e  $52^{\circ}40'$  W). Os sistemas variaram em idade de implantação: TA-AFS5 e RT-AFS5 (28 anos), TA-AFS4 e RT-AFS4 (23 anos), TA-AFS1 e RT-AFS3 (18 anos), TA-AFS2 e RT-AFS1 (15 anos), T3 e RT8 (12 anos), além das VS em TA-VS (28 anos) e RT-VS (25). Predominam Latossolos e Argissolos (Santos *et al.*, 2018) sob clima equatorial úmido (Am), com temperatura média anual de 27 °C, umidade relativa de 80–89% e precipitação anual de 1900 - 2700 mm (Alvares *et al.*, 2013).

### 2.1.1 Coleta e preparo de amostras de solo

As amostragens foram realizadas em 12 sistemas, sendo 5 SAFCs e 1 área de VS em Tomé- Açu, e 5 SAFCs e 1 VS na Região Transamazônica. As coletas abrangeram quatro profundidades do solo (0–10, 10–20, 20–30 e 30–40 cm), totalizando 48 amostras compostas. Para cada camada, foram coletadas cinco porções de solo com o auxílio de trado holandês manual, distribuídas em uma malha regular de 100 × 100 m. As porções de cada profundidade foram homogeneizadas em recipiente limpo, resultando em uma amostra composta representativa por camada. Em seguida, essas amostras foram acondicionadas em sacos de polipropileno identificados armazenadas em caixas de isopor com gelo, garantindo a preservação da microbiota até a chegada ao laboratório, onde foram imediatamente transferidas para congelamento (Teixeira *et al.*, 2017).

As análises foram conduzidas no Laboratório de Solos do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), seguindo os procedimentos metodológicos descritos por (Mendonça; Matos 2005). No laboratório, o solo foi deixado secar ao ar por 24 horas, em ambiente climatizado e protegido da luz solar direta, a fim de manter estáveis os atributos biológicos. Após homogeneização, o material foi peneirado em malha de 2 mm para remoção de partículas maiores, e posteriormente, mantido sob refrigeração até a realização das análises.

### 2.2 MÉTODO DE IRRADIAÇÃO-EXTRAÇÃO

O carbono (MBC) e nitrogênio (MBN) da biomassa microbiana foram determinados pelo método de irradiação-extracção, com análises realizadas em triplicata, conforme descrito por (Mendonça; Matos 2005). Para cada amostra, foram pesados 20 g de solo TFSA em placas de Petri destinadas à irradiação, e mais 20 g em erlenmeyer, mantidas como controle não irradiação.

A irradiação foi realizada em forno micro-ondas Electrolux (modelo ME20R), com tensão de alimentação de 120 V (60 Hz), frequência de 2.450 MHz e potência nominal de 1000 W. Em seguida, foram separados aproximadamente 10 g de solo irradiado e controle para determinação da umidade gravimétrica

(105 °C/24 h), a fim de corrigir os resultados para base seca. A potência real do equipamento foi determinada pela equação (1):

$$P = \frac{C_P \cdot K \cdot \Delta T \cdot m}{t} \quad (1)$$

em que:

$\Delta T = 20^\circ\text{C}$  (variação de temperatura de 1 L de água em 2 minutos);  $P$  = (potência real do aparelho em W);  $K = 4,184 \text{ J ml}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  (fator de conversão);  $m = 1000 \text{ g}$  (massa da água);  $t = 120 \text{ s}$  (tempo de exposição da água ao micro-ondas);  $C_p = 1 \text{ J ml}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$  (capacidade térmica da água).

Com base neste cálculo, o tempo de exposição das amostras ao micro-ondas foi determinado pela equação (2):

$$t = \frac{r \cdot m_t}{P} \quad (2)$$

em que:

$t$  = tempo de exposição (s);  $P$  = potência real do aparelho (W);  $r = 800 \text{ J.g}^{-1}$  (quantidade de energia necessária por grama de solo);  $m$  = massa total das amostras irradiadas (g).

As extrações de MBC e MBN foram realizadas com solução de  $\text{K}_2\text{SO}_4$  0,5 mol  $\text{L}^{-1}$  (pH 6,7), na razão solo seco: solução adequada. O carbono do extrato foi determinado por oxidação úmida com dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) e titulado com sulfato ferroso amoniacial  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  0,03 mol  $\text{L}^{-1}$ . Já o nitrogênio foi quantificado pelo método semi-micro Kjeldahl, com destilação a vapor e titulação com HCl 0,005 mol  $\text{L}^{-1}$ .

### 2.2.1 Cálculo de MBC e MBN

Os valores de carbono (C) e nitrogênio (N) extratos ( $\mu\text{g g}^{-1}$  solo seco) foram calculados a partir da diferença entre amostras irradiadas e os respectivos controles, com correção para base seca, conforme proposto por (Mendonça; Matos 2005). O carbono microbiano (MBC) foi obtido pela equação (3):

$$MBC = \frac{C_I - C_{NI}}{K_c} \text{ (mg.kg}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

em que:

$C_I$ = teor de carbono da amostra irradiada,  $C_{NI}$ = teor de carbono da amostra não irradiada;  
 $K_c = 0,33$ , coeficiente de conversão adotado para o método de irradiação- extração de MBC.

Para o cálculo do nitrogênio microbiano (MBN), foi utilizada a equação (4):

$$MBN(mg.kg}^{-1}\text{) = } \frac{N_I - N_{NI}}{K_n} \quad (4)$$

em que:

$N_I$  = nitrogênio da amostra irradiada;  $N_{NI}$  = nitrogênio da amostra não irradiada;  $K_n = 0,54$ , coeficiente de conversão para MBN.

## 2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2024). A normalidade dos resíduos verificou- se pelo teste de Shapiro-Wilk, e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Levene (Reimann *et al.*, 2008). Quando os pressupostos foram atendidos, aplicou-se ANOVA fatorial para avaliar os efeitos de sistema de uso do solo e profundidade. Interações significativas, foram comparadas pelo teste de Tukey (5%).

Para dados não normais, adotou- se a abordagem não paramétrica: teste de Kruskal-Wallis seguido de Wilcoxon pareado com correção de Bonferroni (Dao *et al.*, 2024). Quando necessário, transformaram- se os dados em log(x), interpretando- se os resultados na escala original. Foram calculadas correlações de Spearman entre os atributos microbianos para identificar associações relevantes entre as variáveis (Reimann *et al.*, 2008).

A Análise de Componentes Principais (PCA) foi aplicada com base em variáveis relacionadas à biomassa microbiana (MBC, MBN e C:N<sub>micr</sub>), areia,

argila, silte, pH e profundidade (Borges, 2024). Essa abordagem multivariada contribuiu para uma análise robusta e interpretação clara dos padrões ecológicos observados.

## 2.4 ANÁLISE FÍSICA E pH

O pH foi determinado por medição potenciométrica na relação solo: água destilada 1:2,5. A análise granulométrica foi conduzida pelo método da pipeta, com pré-dispersão em NaOH 1 mol L<sup>-1</sup> e agitação mecânica. As frações textuais (areia, argila e silte) foram quantificadas com base no diâmetro das partículas (Tabela 1), e os resultados expressos em g kg<sup>-1</sup> (Teixeira *et al.*, 2017).

Tabela 1. Distribuição das frações granulométricas e do pH do solo em diferentes profundidades nos sistemas avaliados nos municípios de Tomé-Açu (TA) e Região Transamazônica (RT), Amazônia Legal do Brasil

Análise	Prof (cm)	Tomé-Açu (TA)						Região Transamazônica (RT)					
		TA-A FS1	TA-A FS2	TA-AFS 3	TA-AFS 4	TA-AFS 5	TA-VS	RT-AFS 1	RT-AFS 2	RT-AFS 3	RT-AFS 4	RT-AFS 5	RT-V S
Sand g kg <sup>-1</sup>	0-10	730	690	450	740	830	530	500	860	820	690	250	550
	10-20	680	660	430	700	790	560	440	810	740	660	240	550
	20-30	600	580	370	680	760	410	380	760	660	650	220	440
	30-40	540	430	310	630	700	400	340	690	610	600	200	440
Clay g kg <sup>-1</sup>	0-10	140	210	420	180	160	400	360	100	130	160	510	350
	10-20	220	260	450	230	190	430	430	140	170	180	530	380
	20-30	310	330	530	270	230	510	500	190	240	220	590	430
	30-40	400	380	600	370	300	570	530	240	290	310	640	470
Silte g kg <sup>-1</sup>	0-10	130	100	130	80	100	70	140	40	50	150	240	100
	10-20	100	80	120	70	200	10	130	50	90	160	230	70
	20-30	90	90	100	50	100	80	120	50	100	130	190	130
	30-40	60	70	90	0	0	30	130	70	100	90	160	90
pH	0-10	4.98	5.13	5.4	5.7	5.6	5.7	5.3	5.8	5.7	6.4	6.5	5.2
	10-20	4.96	4.95	5.3	5.6	5.5	5.8	5.1	5.5	5.3	6.3	6.4	5.2
	20-30	4.76	4.86	5.2	5.4	5.4	5.5	5.1	5.6	5.2	6.3	6.2	5.3
	30-40	4.88	4.97	4.9	5.4	5.3	5.5	5.2	5.2	5.0	6.2	6.2	5.4

Fonte: Autores, 2025

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados revelam a influência dos sistemas de uso da terra e das características regionais sobre a BMS, avaliada por MBC, MBN e da razão C:N<sub>micr</sub> (Tabela 2).

Tabela 2. Médias da biomassa microbiana em diferentes profundidades do solo, sistemas agroflorestais com cacau (SAFCs) e vegetação secundária (VS) no município de Tomé-Açu (T) e Região Transamazônica (RT)

Local	Município de Tomé- Açu												
	MBC	MBN	C:N <sub>mic</sub>	MBC	MBN	C:N <sub>mic</sub>	MBC	MBN	C:N <sub>mic</sub>	MBC	MBN	C:N <sub>mic</sub>	
	mg C kg <sup>-1</sup>	mg N kg <sup>-1</sup>		mg C kg <sup>-1</sup>	mg N kg <sup>-1</sup>		mg C kg <sup>-1</sup>	mg N kg <sup>-1</sup>		mg C kg <sup>-1</sup>	mg N kg <sup>-1</sup>		
0-10 cm			10-20 cm			20-30 cm			30-40 cm				
TA-AFS1	182,75± 55.32c	10.19 ± 5.64a	17.94 ±9.03b	212.71 ± 55.45b	7.84 ± 4.60c	27.13 ±14.05a	295.30 ± 23.53a	15.31 ± 4.72c	19.23 ±3.78a	337.25 ± 29.45a	17.28 ± 1.50b	19.51 ± 3.22a	
TA-AFS2	167.83 ± 84.04c	13.95 ± 1.71a	12.03 ±6.46b	184.23 ± 51.84b	6.93 ± 1.69c	26.60 ± 10.21a	366.82 ± 210.60a	7.72 ± 4.44d	47.71 ±36.53a	257.20 ± 140.26a	9.07 ± 4.67c	28.35 ± 16.12a	
TA-AFS3	263.75 ± 20.99c	18.27 ± 9.55a	14.43 ±4.93b	361.73 ± 154.29ab	17.04 ± 4.49b	21.23 ± 12.26a	487.47 ± 188.88a	16.79 ± 4.93c	29.03 ±15.09a	365.66 ± 148.06a	16.91 ± 2.14b	21.61 ± 10.68a	
TA-AFS4	254.84 ± 60.82c	10.06 ± 6.34a	25.32 ±10.97b	542.58 ± 81.21a	33.95 ± 4.92a	15.98 ± 0.41a	244.51 ± 70.20a	26.54 ± 4.06b	9.21 ±3.19a	501.73 ± 140.87a	21.60 ± 3.96b	23.22 ± 5.93a	
TA-AFS5	501.49 ± 84.66b	16.11 ± 2.77a	31.12 ±2.01b	380.33 ± 75.93ab	17.28 ± 5.99b	22.00 ± 7.12a	386.67 ± 86.03a	26.11 ± 4.34b	14.80 ±4.26a	351.85 ± 104.58a	35.43 ± 3.96a	9.93 ± 3.01a	
TA-VS	1125.93 ± 38.57a	10.80 ± 2.70a	104.22 ±22.90a	317.90 ± 30.04ab	21.23 ± 0.86b	14.97 ± 1.87a	267.47 ± 15.32a	48.46 ± 1.96a	5.52 ±0.14a	466.43 ± 26.05a	30.56 ± 1.95a	15.27 ± 0.43a	
	Região Transamazônica												
RT-AFS1	697.62 ± 325.03ab	35.43 ± 6.52a	19.68 ±5.42b	407.62 ± 192.05b	12.10 ± 7.92b	33.69 ± 19.52a	215.53 ± 57.71b	10.37 ± 9.35b	20.78 ±12.50a	208.51 ± 28.39b	17.22 ± 3.94a	12.10 ± 2.58a	
RT-AFS2	161.41 ± 19.65b	15.31 ± 2.63b	10.54 ±1.37b	225.48 ± 20.87b	25.31 ± 2.80a	8.90 ± 1.24a	243.08 ± 44.44b	19.51 ± 4.78a	12.46 ±3.85a	186.20 ± 90.27b	15.12 ± 6.65a	12.31 ± 5.78a	
RT-AFS3	281.93 ± 55.84b	14.69 ± 3.96b	19.19 ±3.49b	231.61 ± 90.06b	19.88 ± 5.99ab	11.65 ± 5.00a	286.42 ± 167.73b	12.96 ± 2.59ab	22.09 ±12.50a	394.76 ± 114.64b	11.11 ± 1.28a	35.52 ± 7.16a	
RT-AFS4	980.00 ± 99.23ab	35.99 ± 2.65a	27.23 ±0.94ab	330.26 ± 22.51b	26.11 ±4.17a	12.64 ± 1.99a	488.36 ± 88.52ab	17.28 ± 3.96a	28.25 ±3.45a	402.69 ± 187.57b	10.37 ± 5.19a	38.83 ± 20.29a	
RT-AFS5	1885.24 ±393.49a	26.73 ± 0.95ab	70.53 ±16.30a	836.47 ± 108.64b	25.86 ± 2.50a	32.34 ± 1.27a	614.08 ± 8.88a	20.05 ± 4.19a	30.62 ±5.08a	897.85 ± 122.8a	20.68 ± 5.28a	43.41 ± 9.16a	
RT-VS	348.97 ± 58.75a	30.25 ± 0.75a	11.53 ±1.73b	152.79 ± 11.29b	15.43 ± 2.15ab	9.90 ± 1.78a	276.56 ± 42.40b	14.88 ± 2.93ab	18.59 ±3.03a	332.07 ± 19.86b	12.28 ± 1.07a	27.03 ± 0.72a	

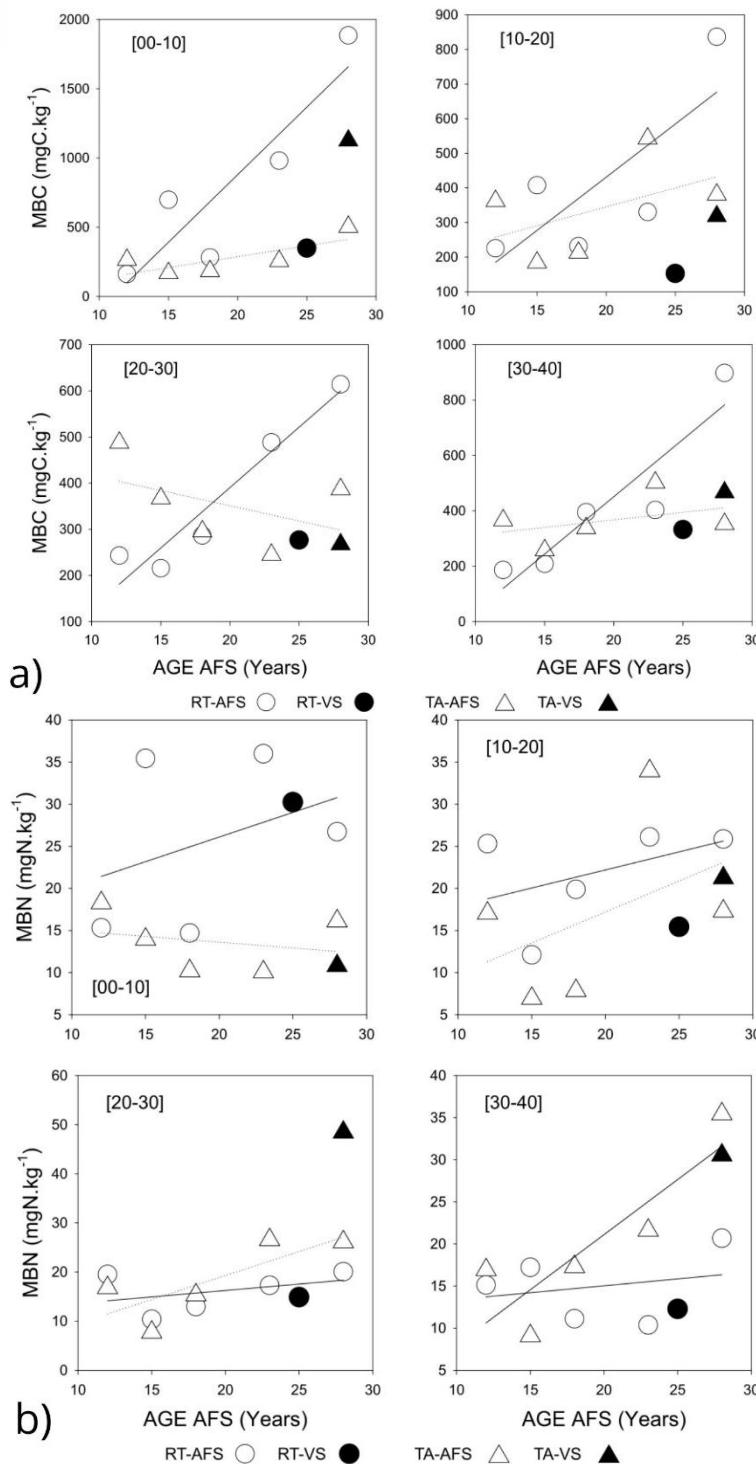
Letras diferentes na mesma linha indicam diferenças estatisticamente significativas entre os sistemas de acordo com o teste de Tukey ( $p \leq 0.05$ )

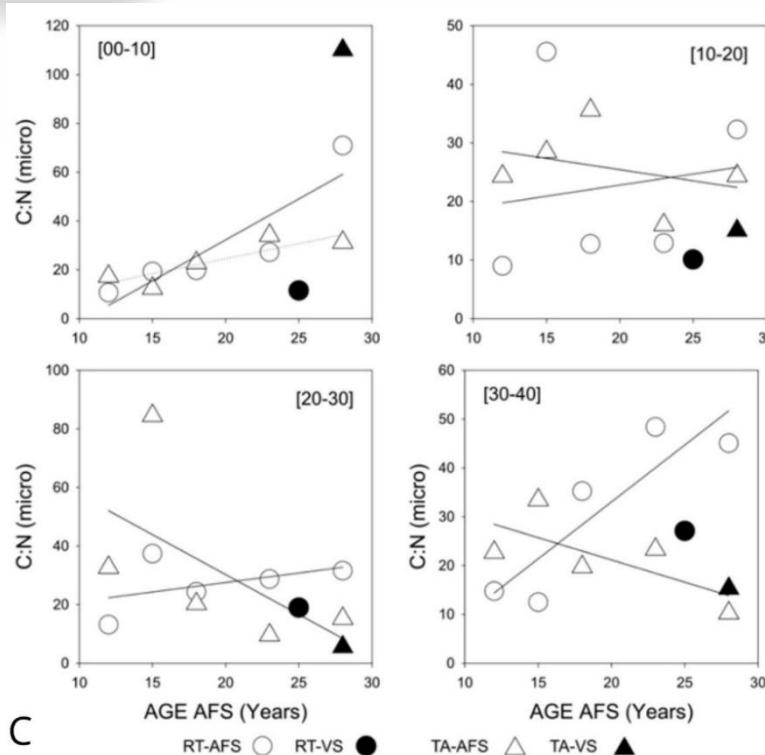
Fonte: Autores, 2025

Os resultados da análise de variância demostraram que o sistema de uso do solo teve efeito significativo sobre os teores de carbono (MBC) e nitrogênio (MBN) da biomassa microbiana do solo ( $p \leq 0,05$ ), enquanto a profundidade do solo e a interação entre esses fatores não apresentaram efeito estatístico significativo ( $p = 0,145$ ) (Tabela 2). Os teores de MBC variaram entre  $161,41 \pm 19,65$  e  $1.885,24 \pm 393,49$  mg C kg<sup>-1</sup>, com os maiores valores registrados nos sistemas RT-AFS5 e RT-AFS4 da Região Transamazônica (RT). Em Tomé-Açu (TA), destacaram-se os sistemas TA-AFS5 e a vegetação secundária (TA-VS) na camada superficial do solo (0–10 cm) (Figura 1a). Para o MBN, os valores oscilaram entre  $6,93 \pm 1,69$  e  $48,46 \pm 1,96$  mg N kg<sup>-1</sup> (Tabela 2), sendo os sistemas RT-AFS1, RT-AFS4, RT-AFS5, e a RT-VS os destaques na RT; na TA, os sistemas TA-AFS4 e TA-AFS5 apresentaram valores elevados, enquanto na TA-VS o maior valor foi observado na camada mais profunda (20–30 cm) (Figura 1b).

A razão C:N<sub>micr</sub> variou acentuadamente, entre  $5,52 \pm 0,14$  e  $104,22 \pm 22,90$  (Tabela 2), com destaque para a TA-VS que apresentou a maior razão na camada superficial (0–10 cm) e a menor na camada profunda (20–30 cm), seguida pelo sistema RT-AFS5 ( $70,53 \pm 16,30$ ) da RT (Figura 1c). A análise de correlação de Spearman revelou associação positiva entre MBC e a razão C:N<sub>micr</sub> ( $\rho = 0,62$ ), e correlação negativa entre esta razão e o MBN ( $\rho = -0,50$ ). Também foi observada correlação positiva entre MBC e MBN ( $\rho = 0,30$ ) e, ainda, correlações positiva de ambos com o pH do solo ( $\rho = 0,41$  e  $\rho = 0,38$ , respectivamente) (Tabela 3).

Figura 1. Relação entre a idade dos sistemas e a MBC, MBN e C:N<sub>micr</sub> em diferentes profundidades do solo (0–40 cm) no município de Tomé-Açu (TA) e Região Transamazônica (RT)





TA-AFS- sistemas agroflorestais de Tomé- Açu (TA); TA-VS- vegetação secundária de TA; RT-AFS-sistemas agroflorestais da Região Transamazônica (RT) e RT-VS- vegetação secundária RT; 1a) - biomassa microbiana de carbono (MBC), 1b) de nitrogênio (MBN) e 1c) razão C:N<sub>micr</sub>

Fonte: Autores, 2025

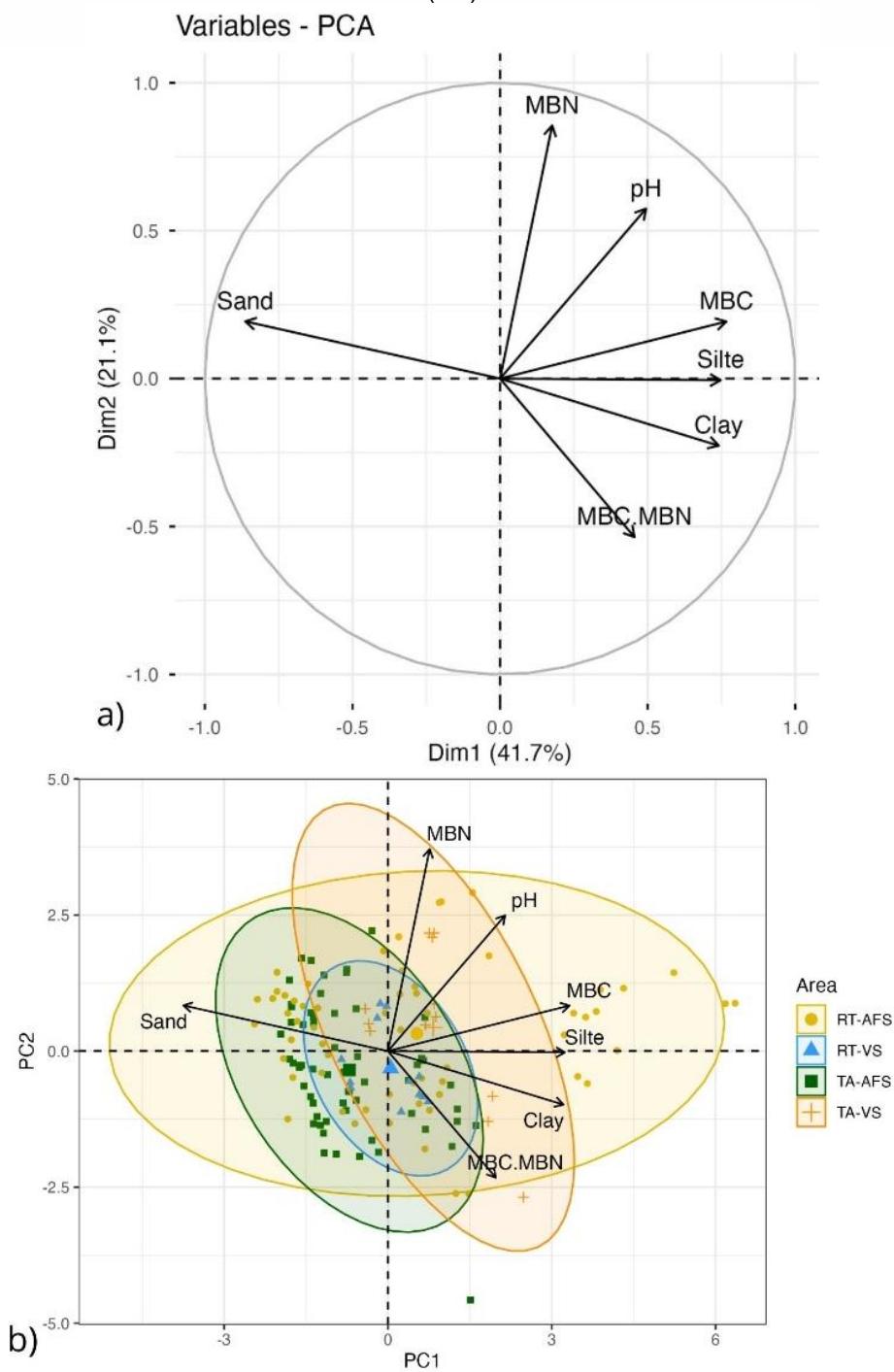
Tabela 3. Matriz de Correlação de Spearman entre profundidade do solo, atributos físicos (areia, argila e silte), pH, e atributos microbiológicos (MBC), (MBN) e razão C:N<sub>micr</sub> em diferentes sistemas de uso do solo

	Depth	Areia	Argila	Silte	pH	MBC	MBN	C.N <sub>micr</sub>
Areia	-0.33	1						
Argila	0.44	-0.95	1					
Silte	-0.16	-0.54	0.29	1				
pH	-0.24	0.03	-0.06	0.11	1			
MBC	0.01	-0.32	0.3	0.18	0.41	1		
MBN	-0.05	-0.05	0.08	-0.04	0.38	0.3	1	
C.N <sub>micr</sub>	0.01	-0.26	0.2	0.28	0.1	0.62	-0.5	1

Fonte: Autores, 2025

Além disso, a Análise de Componente Principal (PCA) explicou 62,8% da variância total nos dois primeiros eixos (Figura 2a). o primeiro componente (Dim. 1; 41,7%) representou um gradiente de textura do solo, associando argila e silte à atividade microbiana expressa por MBC e razão C:N<sub>micr</sub>. O segundo componente (Dim.2; 21,1%) refletiu variações relacionadas à fertilidade e acidez, correlacionando positivamente as variáveis MBN e pH e negativamente a areia.

Figura 2. Análise de Componentes Principais (PCA) das variáveis físicas, químicas e biológicas do solo em diferentes sistemas de uso do solo em Tomé-Açu (TA) e Região Transamazônica (RT)



2a) contribuição das variáveis (vetores) nos dois PCs (Dim. 1 e Dim. 2) e (2b) agrupamento das áreas por elipse de confiança, evidenciando grupo de similaridade

Fonte: Autores, 2025

Tabela 4. Parâmetros da regressão linear entre a idade dos sistemas e os teores de biomassa microbiana em diferentes profundidades do solo em Tomé-Açu (TA) e Região Transamazônica (RT)

Sistema	Região Transamazônica			Tomé- Açu	
	Análise da Regressão (idade :MBC)			Análise da Regressão (idade :C:Nmicr)	
	0-10cm	20-30cm	30-40cm	0-10cm	30-40cm
$\beta_0$	-1072,014	-132,9849	-377,359	-34,850	-13,595
$\beta_1$	97,5653	26,1708	41,4082	3,3546	2,3317
$R^2$	0,817	0,925	0,8494	0,8054	0,7865
p	0,0353	0,0089	0,026	0,0388	0,0449

Biomassa microbiana de carbono (MBC); e razão C:Nmicr; coeficientes da equação de regressão linear ( $\beta_0$  e  $\beta_1$ ); coeficiente de determinação  $R^2$  e valores de significância (p) para quatro profundidades de (0–40 cm). Valores inseridos na tabela indicam significância estatística ( $p \leq 0,05$ )

Fonte: Autores, 2025

Os maiores teores de MBC observados nos sistemas RT-AFS5, TA-AFS5 e na TA-VS refletiram a influência da cobertura vegetal estruturada, tempo de implantação ou regeneração, maior complexidade vegetal e menor perturbação física e química do solo (Figura 1a). Esses fatores favorecem o acúmulo de MOS e o aporte contínuo de resíduos vegetais, condições reconhecidas por promoverem a atividade microbiana especialmente sob manejo adequado (Souza *et al.*, 2022). Ainda, variações claras de MBC entre regiões e sistemas têm sido associadas à influência conjunta de fatores biogeográficos, sazonais e de manejo, reforçando a sensibilidade das comunidades microbianas a contextos ecológicos distintos (Rangel-Vasconcelos *et al.*, 2015; Wei *et al.*, 2022). A análise de regressão entre idades dos sistemas e MBC (Tabela 4), revelou forte associação na RT ( $R^2$  até 0,925 e  $p \leq 0,05$ ), sugerindo que a maturação progressiva dos sistemas eleva gradualmente os estoques de MOS, COS e biomassa microbiana (Tabela 4). Enquanto na TA, a ausência de significância estatística ( $p \geq 0,05$ ) indica maior influência de fatores locais edáficos e manejo na dinâmica microbiana (Côrt *et al.*, 2025; Morales-Belpaire *et al.*, 2024).

Os teores de MBN também refletiram a estabilidade e menor perturbação dos sistemas, com maiores valores em RT- AFS5 e TA- VS (Figura 1b), especialmente onde há presença de árvores leguminosas sombreadoras e apporte adequado de resíduos orgânicos (Souza *et al.*, 2022). Em contrapartida, práticas intensivas e baixa diversidade funcional reduzem os estoques de MBN

com o aumento da profundidade (Eduah *et al.*, 2025). A comparação entre SAFCs e VS revelou padrões regionais distintos: em TA, a TA- VS apresentou MBN superior aos SAFCs em camadas intermediárias, enquanto na RT, SAFCs mais antigos suplantaram a RT-VS, indicando que o potencial restaurador depende da maturidade, composição vegetal e manejo, (Alfaro-Flores *et al.*, 2015). A variação vertical da distribuição do MBN, sem padrão uniforme, possivelmente reflete a complexidade da ciclagem de nutrientes influenciada por diversificação de espécies, sazonalidade e aporte de resíduos conforme já observado na literatura (Zaia *et al.*, 2012). As regressões entre idade dos sistemas e MBN indicam padrões distintos (Tabela 4). Em TA, fatores estruturais e edáficos influenciam o acúmulo de MBN nas camadas profundas, embora sem significância estatística, ao passo que na RT sistemas mais maduros indicam impacto indireto da idade sobre a funcionalidade microbiana ( $p \geq 0,05$ ) (Agbotui *et al.*, 2024; Marques *et al.*, 2025).

A razão C:N<sub>micr</sub> apresentou ampla variabilidade entre os sistemas e regiões (Figura 1c), destacando-se os valores elevados em TA- VS na camada superficial, provavelmente ligados à alta reciclagem de MOS e menor teor de nitrogênio (Cruz *et al.*, 2019). Na RT, sistemas como RT-AFS5 apresentaram elevados índices de C:N<sub>micr</sub> em diversas profundidades, sugerindo acúmulo preferencial de biomassa fúngica ou resíduos mais estáveis, características de ambientes em estágios avançados de sucessão ecológica com maior estabilidade da MOS (Souza *et al.*, 2022) . As análises de regressão evidenciaram tendências crescentes da razão C:N<sub>micr</sub> com a idade dos sistemas, especialmente em profundidades superficiais e profundas, confirmando o seu potencial como bioindicador da trajetória sucessional e da qualidade biológica do solo (Leite *et al.*, 2023). Além disso, a correlação positiva entre MBC e C:N<sub>micr</sub> associada à correção negativa com MBN reflete que solos menos ácidos e com melhor estabilidade física e química favorecem a manutenção da biomassa microbiana (Kaba *et al.*, 2025). A forte correlação negativa entre areia e argila ( $p = -0,95$ ) reforça a importância da textura na retenção hídrica e estabilidade microbiana (Cruz *et al.*, 2019; Tom *et al.*, 2025).

A Análise de Componente Principal (PCA) ressaltou que a função microbiana nos SAFCs e VSs está simultaneamente condicionada à textura e química do solo (Buyer *et al.*, 2017). O primeiro componente destacou a associação forte entre textura (argila e silte) e atividade microbiana (MBC e C:N<sub>micr</sub>), evidenciando o papel da textura na retenção e estabilidade de MOS (Figura 2a). O segundo componente relacionou fertilidade e acidez, refletidas no MBN, pH e no teor de areia (negativamente correlacionou). Esses padrões confirmam a importância integrada dos fatores físicos e químicos na viabilidade microbiana, corroborando estudos anteriores e esclarecendo a variabilidade observada entre áreas e grupos (Marques *et al.*, 2025).

#### 4 CONCLUSÃO

O sistema de uso do solo exerce influência significativa sobre os teores de MBC e MBN, independentemente da profundidade, evidenciando o papel central do manejo, idade e heterogeneidade regional na dinâmica microbiana do solo. Sistemas mais maduros e com maior complexidade vegetal, como RT-AFS5, TA-AFS5 e TA-VS, apresentaram os maiores estoques microbianos, evidenciando a importância da cobertura permanente, aporte de resíduos orgânicos e menor perturbação para o acúmulo e estabilidade da biomassa microbiana. A razão C:N<sub>micr</sub> se configurou como um indicador sensível da trajetória sucessional e da qualidade biológico do solo, correlacionando- se positivamente com MBC e negativamente com MBN, mostrando a interação entre estabilidade e mineralização dos nutrientes.

Além disso, a análise multivariada (PCA) ressaltou a influência integrada da textura e da química do solo na sustentabilidade da atividade microbiana, destacando o papel da argila e silte na retenção da MOS e evidenciando que pH e fertilidade são determinantes para o acúmulo e funcionalidade da biomassa de nitrogênio. Esses achados confirmam que a função microbiana em SAFCS e VS está condicionada por fatores físicos, químicos e biológicos, cujo manejo adequado é fundamental para o potencial restaurador e funcional dos sistemas. As futuras pesquisas devem investigar o efeito da sazonalidade na atividade

microbiana e aprofundar a caracterização funcional do solo por métodos moleculares e enzimáticos, ampliando o entendimento das respostas microbianas ao manejo e às mudanças ambientais na Amazônia.

### AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) pelo suporte no processamento de dados no Laboratório de Eco Solo, às agencias CAPES e CNPq pelo financiamento deste projeto, e às nossas instituições pelo apoio direto e indireto que tornou esta pesquisa possível.

## REFERÊNCIAS

- AGBOTUI, D. K.; INGOLD, M.; JOERGENSEN, R. G.; BUERKERT, A. (2024). Soil fertility indices in cocoa agroforests under organic and conventional management in Suhum, Eastern Region of Ghana. **Experimental Agriculture**, v. 60, e27, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1017/S001447972400019X>
- ALFARO-FLORES, A.; MORALES-BELPAIRE, I.; SCHNEIDER, M. (2015). Microbial biomass and cellulase activity in soils under five different cocoa production systems in Alto Beni, Bolivia. **Agroforestry Systems**, v. 89, p. 789-798, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9812-z>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ASIGBAASE, M.; DAWOE, E.; LOMAX, B. H.; SJØGERSTEN, S. Biomass and carbon stocks of organic and conventional cocoa agroforests, Ghana. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 306, 107192, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107192>
- BARROS, G. B. de; BEZERRA, L. T.; BARBOSA, D. M.; SILVA, A. F. V. da; ROMEIRO, A. L. M.; ARAÚJO, E. S. de. Mecanismos causadores de pressão e impacto ambiental sobre os ecossistemas e florestas nativas. In: OLIVEIRA, R. J. de (org.). **Silvicultura e Manejo Florestal: Técnicas de Utilização e Conservação da Natureza - Volume 1**. [Guarujá]: Editora Científica Digital, 2021. p. 233-252. Doi: <https://doi.org/10.37885/201102102>
- BASTIDA, F.; ELDRIDGE, D. J.; GARCÍA, C.; KENNY PNG, G.; BARDGETT, R. D.; DELGADO-BAQUERIZO, M. Soil microbial diversity–biomass relationships are driven by soil carbon content across global biomes. **ISME Journal**, v. 15, n. 7, p. 2081-2091, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41396-021-00906-0>
- BUYER, J. S.; BALIGAR, V. C.; HE, Z.; ARÉVALO-GARDINI, E. Soil microbial communities under cacao agroforestry and cover crop systems in Peru. **Applied Soil Ecology**, v. 120, p. 273-280, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.09.009>
- CÔRT, A. S. D.; PACHECO, L. P.; TESSAROLLI, B. M.; BATISTA, É. R.; GUEDES, T. R. M.; RESENDE, V. H. L. de; PETTER, F. A.; SOUZA, E. D. de; FERRARI NETO, J.; RIGON, J. P. G.; CRUSCIOL, C. A. C. Cover crop diversity improves the biochemical, physical and microbiological attributes of soil under long-term no-tillage. **Applied Soil Ecology**, v. 215, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2025.106494>
- CRUZ, L. G.; BASTIDAS, A. T. C.; SUÁREZ, L. R.; SALAZAR, J. C. S. Microbial properties of soil in different coverages in the Colombian amazon. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.105117>

DAO, P. B.; BARCZEWSKI, R.; STASZEWSKI, W. J. Misalignment fault detection in rotor-shaft systems under varying load conditions based on Kruskal-Wallis test and Tukey's honestly significant difference test. **SSRN**, 2024. This is a preprint article. Doi: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4757996>

DAZZI, C.; LO PAPA, G. A new definition of soil to promote soil awareness, sustainability, security and governance. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 1, p. 99-108, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.07.001>

EDUAH, J. O.; ARTHUR, A.; AMOAKO-ATTAH, I.; MANSO, E. F.; QUAYE, A. K.; DOGBATSE, J. A.; PADI, F. K. Differential impacts of organic and chemical fertilization on soil organic carbon pools and stability, and soil quality in cacao agroforestry. **Soil and Environmental Health**, v. 3, n. 3, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.seh.2025.100147>

FARADILLA, L.; MUSTARI, K.; ASRUL, L.; KAIMUDDIN. Carbon stock analysis of some cocoa planting systems in climate change mitigation efforts in East Luwu Regency. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 486, n. 1, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012083>

JAVED, A.; ALI, E.; BINTE AFZAL, K.; OSMAN, A.; RIAZ, S. Soil fertility: factors affecting soil fertility, and biodiversity responsible for soil fertility. **International Journal of Plant, Animal and Environmental Sciences**, v. 12, n. 1, p. 21-33, 2022. Doi: <https://doi.org/10.26502/ijpaes.202129>

KABA, J. S.; ADUSEI, F. F.; AHENKORAH, B.; OHUI, O. I.; NTIAMOAH, P.; QUANSAH, E. O.; BOADU, K. B.; DOMPREH, D. Variations in soil biological and physicochemical properties of reclaimed artisanal mining sites under cocoa cultivation in Ghana across different reclamation ages. **Sustainable Environment**, v. 11, n. 1, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1080/27658511.2025.2508543>

LEITE, M. F. A.; LIU, B.; GÓMEZ CARDOZO, E.; SILVA, H. R. E.; LUZ, R. L.; MUCHAVISOY, K. H. M.; MORAES, F. H. R.; ROUSSEAU, G. X.; KOWALCHUK, G.; GEHRING, C.; KURAMAE, E. E. Microbiome resilience of Amazonian forests: Agroforest divergence to bacteria and secondary forest succession convergence to fungi. **Global Change Biology**, v. 29, n. 5, p. 1314-1327, 2023. Doi: <https://doi.org/10.1111/gcb.16556>

LEITE-FILHO, A. T.; SOARES-FILHO, B. S.; DAVIS, J. L.; ABRAHÃO, G. M.; BÖRNER, J. Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, v. 12, n. 1, Article number: 2591, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point: Last chance for action. **Science Advances**, v. 5, n. 12, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2949>

MARQUES, J. D.; DIAS, V. H. R.; GOMES, M. F.; SAMPAIO, I. M. G.; BORGES, G. B.; FIEL, L. G.; SILVA JÚNIOR, M. L. da; MELO, V. S. de. Soil

quality in an agroforestry system in the scenario of family farming in the eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 99, n. 6, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01272-y>

MENDONÇA, E. de S.; MATOS, E. da S. (ed.). **Matéria orgânica do solo: métodos de análises**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 107 p.

MORAES, L. F. D.; AMÂNCIO, C. O. da G.; RESENDE, A. S. **Sistemas agroflorestais para o uso sustentável do solo**: considerações agroecológicas e socioeconômicas. Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2011. 28 p. (Embrapa Agrobiologia. Documentos, 281).

MORALES-BELPAIRE, I.; ALFARO-FLORES, A.; LOSANTOS-RAMOS, K.; PALABRAL-VELARDE, O.; AMURRIO-ORDÓÑEZ, P.; ARMENGOT, L. Soil quality indicators under five different cacao production systems and fallow in Alto Beni, Bolivia. **Agroforestry Systems**, v. 98, p. 2517-2532, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01048-w>

RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; ZARIN, D. J.; OLIVEIRA, F. de A.; VASCONCELOS, S. S.; CARVALHO, C. J. R. de; SANTOS, M. M. de L. S. Efeito da disponibilidade de água sobre a biomassa microbiana do solo em floresta secundária na Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 377-384, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1590/01000683rbcs20140135>

REIMANN, C.; FILZMOSER, P.; GARRETT, R. G.; DUTTER, R. **Statistical data analysis explained**: applied environmental statistics with R. [Chippingham]: J. Wiley, 2008. 368 p.

REIS JÚNIOR, F. B. dos; MENDES, I. de C. **Biomassa microbiana do solo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 40 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 205).

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; FILHO, J. C. A.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa Brasília, 2018. v. 5a edição. 356 p.

SOUZA JUNIOR, R. S. de; BORGES, E. M. Teaching statistics and chemometrics using an open source, free and graphical user interface software. **ChemRxiv**, 2024. This content is a preprint and has not been peer-reviewed. Doi: <https://doi.org/10.26434/chemrxiv-2024-dnb gj>

SOUZA, T.; BARROS, I. C.; SILVA, L. J. R. da; LAURINDO, L. K.; NASCIMENTO, G. dos S.; LUCENA, E. O. de; MARTINS, M.; SANTOS, V. B. dos. Soil microbiota community assembling in native plant species from Brazil's legal Amazon. **Symbiosis**, v. 86, n. 1, p. 93-109, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1007/s13199-021-00828-7>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (ed.). **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017. 574 p.

TOM, A.; DIVYA VIJAYAN, V.; KUNHAMU, T. K.; SANDEEP, S.; SURENDRA GOPAL, K.; JAMALUDHEEN, V.; VISHNU, B. R. Plant diversity and microbial interaction on soil carbon stock in the tropical homegardens: a nature-based solution to climate change. **Agroforestry Systems**, v. 99, n. 2, article number 29, 2025. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01135-6>

VANHOVE, W.; VANHOUDT, N.; VAN DAMME, P. Effect of shade tree planting and soil management on rehabilitation success of a 22-year-old degraded cocoa (*Theobroma cacao L.*) plantation. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 219, p. 14-25, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.12.005>

WEI, Y.; QUAN, F.; LAN, G.; WU, Z.; YANG, C. Space rather than seasonal changes explained more of the spatiotemporal variation of tropical soil microbial communities. **Microbiology Spectrum**, v. 10, n. 6, e01846-22, 2022. Doi: <https://doi.org/10.1128/spectrum.01846-22>

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; MOÇO, M. K. S.; FONTES, A. G.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 86, n. 2, p. 197-212, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9550-4>