

DINÂMICA DO USO E COBERTURA DA TERRA E EXPANSÃO DA DENDEICULTURA NO MUNICÍPIO DE TOMÉ-AÇU, AMAZÔNIA ORIENTAL (1985-2024)

1-Eder Silva de Oliveira; 2-Gilmara Maureline Teles da Silva de Oliveira; 3-Jefferson Valadares Matos; 4-Izabeli da Silva Rodrigues; 5-Glaize Rodrigues Wanzeler; 6-Henrique Magno Coutinho; 7- Maria Carolina Oliveira Carvalho; 8- Kayo Diuary Rodrigues Silva

1Doutor em Agronomia, professor dos Programas de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia e em Geografia da Universidade do Estado do Pará. Belém-PA. E-mail: ederuepa@gmail.com

2 Doutora em Desenvolvimento Sustentável pela Universidade Federal Rural da Amazônia. Belém-PA.

3Graduando em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Pará. Belém-PA.

4Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade do Estado do Pará (PPGTEC/UEPA). Belém-PA.

5Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Federal do Pará (PPGCA/UFPA). Belém-PA.

6Engenheiro ambiental e sanitaria da Universidade do Estado do Pará (UEPA). Belém-PA.

7Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade do Estado do Pará (PPGG/UEPA). Belém-PA.

8Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, Recursos Naturais e Sustentabilidade na Amazônia da Universidade do Estado do Pará (PPGTEC/UEPA). Belém-PA.

Recebido em: 15/08/2026 – Aprovado em: 05/09/2026 – Publicado em: 30/09/2026
DOI: 10.18677/EnciBio_2026C7

RESUMO

A expansão da dendeicultura (*Elaeis guineensis*) na Amazônia Oriental tem sido associada à perda de cobertura florestal, embora a natureza dessa relação permaneça pouco compreendida. Analisou-se a dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra em Tomé-Açu, Pará, de 1985 a 2024, com ênfase na expansão do dendê, em sua relação com a perda florestal e em seus determinantes espaciais. A partir da série anual da Coleção 10 do MapBiomas, quantificaram-se a dinâmica das classes, as trajetórias de conversão, o Índice de Transformação Antrópica e a autocorrelação espacial; os determinantes foram modelados por Regressão Logística Geograficamente Ponderada (GWR) e por *Random Forest*. A cobertura florestal retraiu 31,8% no período, tendo a pastagem constituído o principal fator direto de desmatamento. A reconstituição da trajetória anual revelou que 72,4% da área cumulativamente ocupada por dendê (1985-2024) estabeleceram-se sobre terrenos anteriormente florestados, predominantemente por meio de uso intermediário; a análise por anos de corte identificou associação histórica entre floresta pretérita e dendê aproximadamente nove vezes menor que a série anual. GWR e *Random Forest* identificaram, de forma convergente, a proximidade das áreas antropizadas, efeito de contágio, como o determinante espacial dominante.

Conclui-se que a expansão do dendê processa-se sobre a fronteira agropecuária consolidada, ocupando majoritariamente terrenos cuja supressão florestal precedeu, em etapa temporalmente distinta, o estabelecimento da cultura.

PALAVRAS-CHAVE: Dendê; Mudança de uso da terra; sensoriamento remoto.

LAND USE AND LAND COVER DYNAMICS AND OIL PALM EXPANSION IN TOMÉ-AÇU, EASTERN AMAZONIA (1985-2024)

ABSTRACT

Oil palm (*Elaeis guineensis*) expansion in Eastern Amazonia has been linked to forest cover loss, although the nature of this relationship remains poorly understood. This study analyzed the spatiotemporal dynamics of land use and land cover in Tomé-Açu, Pará, from 1985 to 2024, focusing on oil palm expansion, its relationship with forest loss, and its spatial determinants. Using the annual MapBiomas Collection 10 series, we quantified class dynamics, conversion trajectories, the Anthropic Transformation Index, and spatial autocorrelation; determinants were modeled through Geographically Weighted Regression (GWR) and Random Forest. Forest cover declined 31.8% over the period, with pasture as the main direct driver of deforestation. Annual trajectory reconstruction revealed that 72.4% of the cumulative oil palm footprint (1985-2024) was established on formerly forested land, predominantly through intermediate land use; cross-date analysis detected a historical association between past forest cover and oil palm roughly ninefold weaker than the annual series. GWR and Random Forest convergently identified proximity to anthropized areas, a contagion effect, as the dominant spatial determinant. Oil palm expansion proceeds over the consolidated agricultural frontier, occupying land whose forest clearing preceded, in a temporally distinct stage, the establishment of the crop.

KEYWORDS: Oil palm; Land use change; remote sensing.

INTRODUÇÃO

A região amazônica brasileira tem experimentado transformações territoriais significativas, impulsionadas pelo avanço da fronteira agropecuária e pela expansão de cultivos destinados ao mercado de *commodities*. A conversão da cobertura florestal para usos agropecuários resultou em alterações profundas na dinâmica ambiental e paisagística, aumentando a pressão sobre os recursos naturais (FEARNSIDE, 2022). A mesorregião do Nordeste Paraense destaca-se como uma das áreas de ocupação mais antiga e de transformação mais intensa da Amazônia Oriental, tendo passado por fases sucessivas de exploração madeireira, expansão pecuária e, mais recentemente, introdução de cultivos agroindustriais (HOMMA, 2022).

Dentre esses cultivos, a dendeicultura (*Elaeis guineensis*) desempenha papel cada vez mais relevante na reconfiguração da paisagem regional. Impulsionada por políticas públicas de incentivo, como o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (2004) e o Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma (2010), acompanhado do Zoneamento Agroecológico do Dendê, a cultura expandiu-se rapidamente no estado do Pará, principal produtor nacional (SILVA; NAVEGANTES-ALVES, 2017). A formação dessa cadeia produtiva remonta à década de 1950, quando o Estado atuou como agente estruturante da introdução do dendezeiro na Amazônia, da criação das empresas dendeicultoras e da concentração do cultivo na

Microrregião de Tomé-Açu (NAHUM *et al.*, 2020; NAHUM; SANTOS, 2022). Essas políticas previam a destinação da cultura exclusivamente a áreas já desmatadas, principalmente pastagens degradadas, visando reduzir a pressão sobre os remanescentes florestais (RAMALHO FILHO *et al.*, 2010).

O município de Tomé-Açu desempenha papel emblemático nesse contexto. Reconhecido pela tradição da agricultura de imigração japonesa e pela consolidação de sistemas agroflorestais biodiversos (BOLFE; BATISTELLA, 2011), tornou-se, nas últimas duas décadas, um dos principais polos de expansão da dendeicultura na Amazônia Oriental. A coexistência de sistemas agroflorestais consolidados e monocultivos em larga escala torna o município um espaço privilegiado para a análise das transformações associadas à expansão do dendê (CARVALHO; NAHUM, 2019). Os sistemas agroflorestais proporcionam serviços ecossistêmicos cujo valor, segundo a percepção da população local, supera o dos sistemas comerciais como o dendê e a soja (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Diversos estudos documentaram, na Amazônia, o predomínio da ocupação de pastagens em relação à supressão direta de florestas durante a expansão do dendê. No entanto, a maioria dessas análises baseia-se em comparações entre anos de corte, abordagem que, ao considerar apenas situações extremas de um intervalo, não captura as conversões intermediárias. Dessa forma, a dimensão indireta da relação entre dendeicultura e perda florestal, em que a supressão da floresta e o estabelecimento da cultura ocorrem em etapas temporalmente distintas de uma mesma cadeia de conversão, permanece pouco compreendida. Ademais, os determinantes espaciais da expansão ainda não foram quantificados de forma satisfatória em escala local (BARROS *et al.*, 2025; BARROS; CHIMELI, 2026).

Diante desse contexto, o presente estudo analisa o processo de expansão do dendê em Tomé-Açu entre 1985 e 2024, suas relações com a dinâmica histórica da cobertura florestal e os determinantes espaciais que a condicionam. Para tanto, utilizou-se a série anual completa de uso e cobertura da terra, visando superar as limitações das análises baseadas exclusivamente em anos de corte.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e base de dados

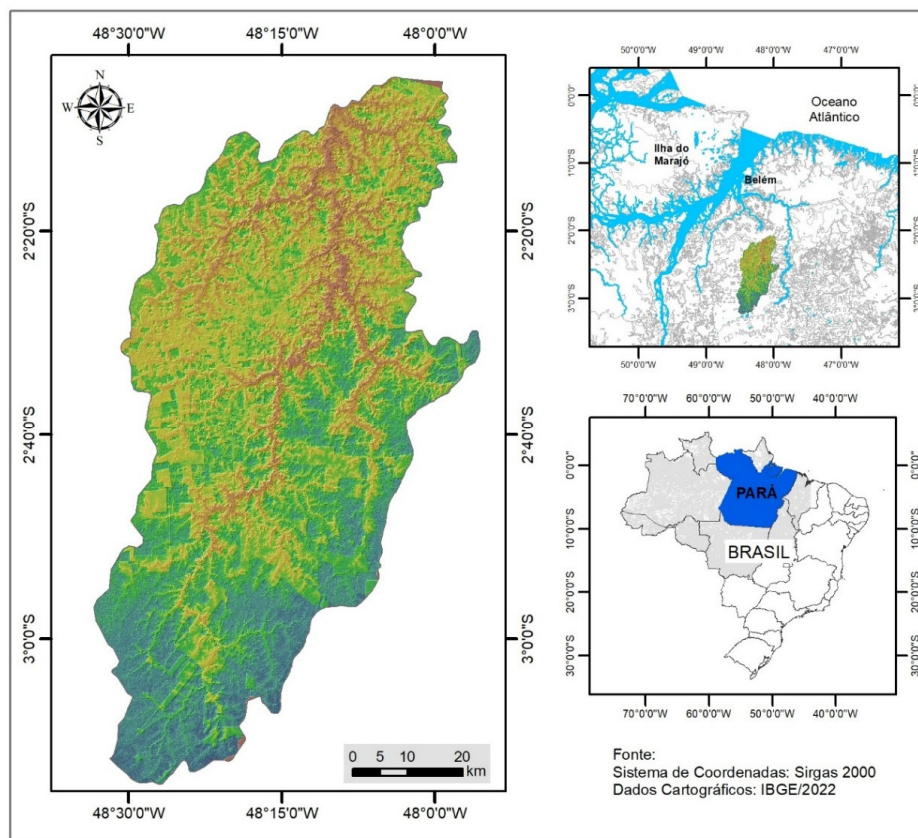
O município de Tomé-Açu está situado na mesorregião do Nordeste Paraense, na Amazônia Oriental, abrangendo aproximadamente 5.145 km² (IBGE, 2025) (Figura 1). A dinâmica de uso e cobertura da terra foi analisada utilizando a Coleção 10 do MapBiomas, que disponibiliza mapeamento anual com resolução de 30 m para o período de 1985 a 2024, a partir do processamento em nuvem de imagens Landsat (SOUZA JUNIOR *et al.*, 2020).

A Coleção 10 inclui uma classe temática específica para o dendê, possibilitando o monitoramento anual dessa cultura. As classes originais foram agrupadas em seis categorias: Floresta (Formação Florestal e Formação Savânica), Floresta Alagável, Pastagem, Dendê, Soja e Outros. A categoria 'Outros' abrange usos de pequena expressão areal, como a silvicultura, que aumentou de 15 ha em 1985 para 451 ha em 2024.

As variáveis de relevo foram obtidas a partir do modelo digital de elevação SRTM, com resolução de 30 m (FARR *et al.*, 2007). A rede viária foi definida pela malha de rodovias e estradas do município, composta por 1.590 segmentos e aproximadamente 2.118 km. Todos os dados foram reprojatados para o sistema

UTM, fuso 22S, datum SIRGAS 2000 (EPSG:31982). O processamento e a extração de estatísticas zonais foram realizados por meio do *Google Earth Engine* e *Python*.

FIGURA 1. Localização do município de Tomé-Açu, mesorregião do Nordeste Paraense, estado do Pará, Amazônia Oriental.



Fonte: Os autores (2026)

Dinâmica e cadeia de conversão

A dinâmica foi caracterizada para a série anual completa (1985-2024), com quantificação das áreas de cada classe em cada ano. Foram também elaboradas matrizes de transição para os anos de corte de 2005, 2010, 2015, 2020 e 2024, possibilitando quantificar as conversões entre classes. Contudo, a análise entre anos de corte, embora amplamente utilizada, não captura conversões intermediárias. Por exemplo, quando uma área de floresta é convertida em pastagem e, posteriormente, ocupada pelo dendê, a análise quinquenal registra duas transições distintas e não associa a floresta perdida à cultura do dendê.

Para superar essa limitação, foi reconstituída a trajetória anual de cada célula que apresentou dendê no período analisado. Para cada pixel classificado como dendê, identificou-se o ano da primeira detecção e verificou-se a presença de Formação Florestal em qualquer ano anterior, distinguindo conversão direta (floresta para dendê) de indireta (floresta, uso intermediário, dendê). Os resultados foram comparados àqueles obtidos pela análise entre anos de corte, no mesmo intervalo (2010-2024), com o objetivo de isolar o efeito do método.

Índice de Transformação Antrópica

O grau de transformação antrópica foi avaliado pelo Índice de Transformação Antrópica (ITA), proposto por Lèmechev (1982) e adaptado por Mateo (1984), ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.23 n.57; p.88 2026

amplamente aplicado em estudos recentes de degradação da paisagem (SILVA *et al.*, 2023). O índice pondera a participação relativa de cada classe por um peso correspondente ao grau de intervenção, segundo $ITA = \sum (\% \text{área}_i \times \text{peso}_i) / 100$, com pesos variando de 1 (menor intervenção) a 10 (maior). Adotaram-se peso 1 para formações naturais, 5 para pastagem, 7 para dendê e culturas perenes, 8 para culturas temporárias e áreas não vegetadas, e 10 para área urbanizada e mineração. O índice foi calculado para cada ano e classificado segundo as categorias de degradação (SILVA *et al.*, 2023): pouco degradada (0-2,5), regular (2,5-5,0), degradada (5,0-7,5) e muito degradada (7,5-10). O ITA foi ainda espacializado em grade de 1 km.

Autocorrelação espacial e modelagem

A estrutura espacial da conversão foi avaliada discretizando-se o município em grade de 1 km, para a qual se calculou a densidade de conversão de floresta em dendê. Computaram-se o Índice de Moran Global (I) e os Indicadores Locais de Associação Espacial (LISA), com matriz de pesos do tipo Rainha (Queen) e 999 permutações ao nível de 5% (ANSELIN, 1995); os agrupamentos Alto-Alto foram interpretados como focos de conversão.

Os determinantes da expansão foram modelados na grade de 1 km, com variável dependente binária (1 para células com expansão de dendê entre 2010 e 2024; 0 para as demais). O ano de 2010 foi adotado como marco inicial por anteceder o principal período de expansão, evitando circularidade. A sensibilidade ao critério foi avaliada por três limiares ($\geq 5\%$, $\geq 10\%$ e $\geq 25\%$ da área da célula). Consideraram-se três variáveis explicativas: distância das áreas antropizadas em 2010, distância da rede viária e declividade (derivada do SRTM), padronizadas (escore-z); a multicolinearidade foi avaliada por VIF e matriz de correlação.

Ajustou-se, inicialmente, uma regressão logística global (*baseline*) e, em seguida, a Regressão Logística Geograficamente Ponderada (GWR) com família binomial, núcleo adaptativo *bisquare* e busca de largura de banda por minimização do AICc (FOTHERINGHAM *et al.*, 2002). A busca por AICc retornou larguras muito reduzidas ($bw = 222$ a 450 vizinhos), que produziram coeficientes locais explosivos por separação perfeita e multicolinearidade em vizinhanças pequenas; adotou-se, portanto, o menor valor a partir do qual os coeficientes se estabilizaram ($bw = 600$ vizinhos), avaliados pelo valor t local ($|t| > 1,96$).

A calibração foi executada em Python com o pacote *mgwr* (OSHAN *et al.*, 2019). Como abordagem complementar, de natureza não paramétrica, aplicou-se o algoritmo *Random Forest* (BREIMAN, 2001), com 500 árvores, partição treino (70%) e teste (30%), desempenho avaliado por AUC com validação cruzada de cinco partições e importância estimada por permutação.

A utilização de inteligência artificial generativa limitou-se à organização textual, formatação e geração de figuras a partir de dados próprios dos autores, utilizando a ferramenta Claude (Anthropic). Nenhum conteúdo científico, dado ou resultado foi produzido pela IA. Em conformidade com Brasil (2026), os autores asseguram a integridade, originalidade e validação dos resultados apresentados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dinâmica de uso e cobertura da terra (1985-2024)

A série anual demonstrou intensa transformação da paisagem em Tomé-Açu (Figura 2). A Formação Florestal, predominante durante todo o período, reduziu-se

de 401.609 ha em 1985 (77,9% do território) para 273.824 ha em 2024 (53,1%) (Tabela 1), representando uma perda de 127.785 ha, ou 31,8% da floresta inicial. Essa retração ocorreu de maneira contínua e progressiva, sem indícios recentes de estabilização.

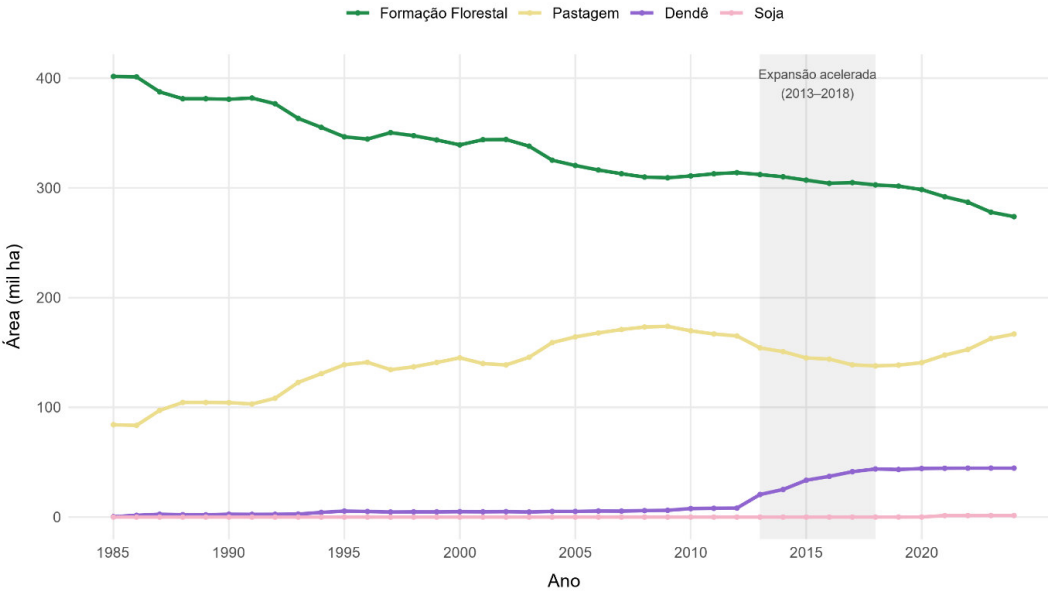
Em contraste, a área de Pastagem aumentou de 84.184 ha em 1985 para 166.815 ha em 2024, um acréscimo líquido de 82.631 ha, praticamente o dobro da expansão observada para o dendê. Esse crescimento destaca a pecuária como principal fator de substituição da cobertura florestal. O dendê permaneceu com área reduzida até o início da década de 2010, passando de 8.170 ha em 2012 para 20.564 ha em 2013 e 43.845 ha em 2018, estabilizando-se em 44.601 ha em 2024, em consonância com a consolidação dos investimentos agroindustriais em óleo de palma na região (SILVA; NAVEGANTES-ALVES, 2017). Observou-se também o surgimento recente da soja, ausente até 2020 e atingindo 1.407 ha em 2024.

TABELA 1. Área (ha) e participação relativa (%) das principais classes de uso e cobertura da terra em Tomé-Açu (PA), anos selecionados (1985-2024).

Classe	1985	2000	2010	2024
Formação Florestal	401.609 (77,9%)	339.221 (65,8%)	310.921 (60,3%)	273.824 (53,1%)
Floresta Alagável	25.475 (4,9%)	21.761 (4,2%)	23.948 (4,6%)	23.871 (4,6%)
Pastagem	84.184 (16,3%)	145.147 (28,2%)	169.759 (32,9%)	166.815 (32,4%)
Dendê	373 (0,1%)	4.903 (1,0%)	7.727 (1,5%)	44.601 (8,7%)
Soja	0 (0,0%)	1 (0,0%)	5 (0,0%)	1.407 (0,3%)
Outros	3.954 (0,8%)	4.563 (0,9%)	3.235 (0,6%)	5.078 (1,0%)

Fonte: Os autores (2026)

FIGURA 2. Evolução da área ocupada pelas principais classes de uso e cobertura da terra em Tomé-Açu (PA), 1985-2024. A faixa sombreada indica o período de expansão acelerada do dendê (2013-2018).



Fonte: Os autores (2026)

Cadeia de conversão da cobertura florestal

A comparação entre métodos, sobre o mesmo intervalo (2010-2024), evidenciou a limitação da análise por anos de corte. Entre 2010 e 2024, a conversão

direta de Formação Florestal em dendê correspondeu a apenas 3.809 ha; a reconstituição da trajetória anual, porém, revelou que 34.412 ha de dendê haviam sido floresta em algum ano anterior à detecção. A diferença indica que a análise por anos de corte captou uma associação histórica entre floresta pretérita e dendê aproximadamente nove vezes menor do que a da trajetória anual, por não registrar as conversões realizadas por estados intermediários.

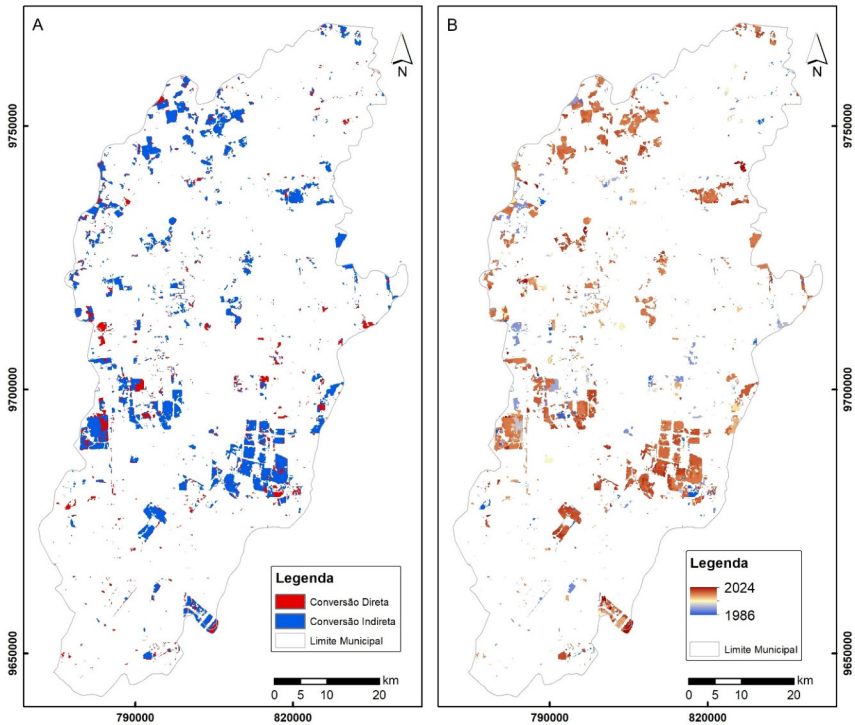
Considerada a série completa (1985-2024), 43.742 ha (Tabela 2), equivalentes a 72,4% da área cumulativamente ocupada por dendê no período, estabeleceram-se sobre terrenos antes florestados.

TABELA 2. Origem da conversão para dendê em Tomé-Açu (PA), por método de detecção (2010-2024) e trajetória histórica completa (1985-2024).

Indicador	Valor
Conversão floresta → dendê (anos de corte, 2010-2024)	3.809 ha
Conversão floresta → dendê (série anual, 2010-2024)	34.412 ha
Razão série anual / anos de corte	9,0×
Área líquida convertida em dendê (2005-2024)	43.705 ha
Origem imediata: pastagem (% sobre 43.705 ha convertidos, 2005-2024)	38.662 ha (88,5%)
Origem imediata: floresta (direta)	3.981 ha (9,1%)
Origem imediata: outras classes	1.062 ha (2,4%)
Dendê sobre área outrora florestada (1985-2024, % sobre área cumulativa ~60.400 ha)	43.742 ha (72,4%)
Via conversão direta	22%
Via conversão indireta	78%

Fonte: Os autores (2026)

FIGURA 3. Trajetórias de conversão para o cultivo de dendê sobre floresta pretérita em Tomé-Açu (PA): (A) conversão direta e indireta; (B) ano da primeira detecção (1986-2024).



Fonte: Os autores (2026).

A base cumulativa (aproximadamente 60.400 ha) contempla todos os pixels classificados como dendê em algum ano da série, incluindo áreas de replantio e reversões posteriores, e difere do estoque de 44.601 ha registrado em 2024. A decomposição demonstrou o predomínio da via indireta: Apenas 22% por conversão direta e 78% por estados intermediários, majoritariamente pela pastagem. A origem imediata confirmou o padrão: 88,5% do dendê estabelecido entre 2005 e 2024 originou-se de pastagem e apenas 9,1% de floresta em conversão direta. O mapeamento evidenciou a distribuição espacial do processo (Figura 3).

Grau de transformação antrópica

O ITA evoluiu de 1,696 em 1985 para 2,893 em 2024 (Tabela 3), acréscimo de 1,197. Segundo a classificação de degradação da paisagem (SILVA *et al.*, 2023), o município transitou de "pouco degradada" para "regular" em 2014 na série anual, ao passo que a análise por anos de corte detectou a transição apenas em 2015, coincidindo com a fase de expansão acelerada do dendê e de consolidação da pastagem.

TABELA 3. Evolução do Índice de Transformação Antrópica (ITA) e respectiva classe de degradação em Tomé-Açu (PA), 1985-2024.

Ano	ITA	Classe
1985	1,696	Pouco degradada
1990	1,871	Pouco degradada
1995	2,178	Pouco degradada
2000	2,228	Pouco degradada
2005	2,362	Pouco degradada
2010	2,438	Pouco degradada
2014	2,511	Regular
2015	2,570	Regular
2020	2,693	Regular
2024	2,893	Regular

Pesos: naturais = 1; pastagem = 5; dendê e perenes = 7; temporárias e não vegetadas = 8; urbano e mineração = 10.

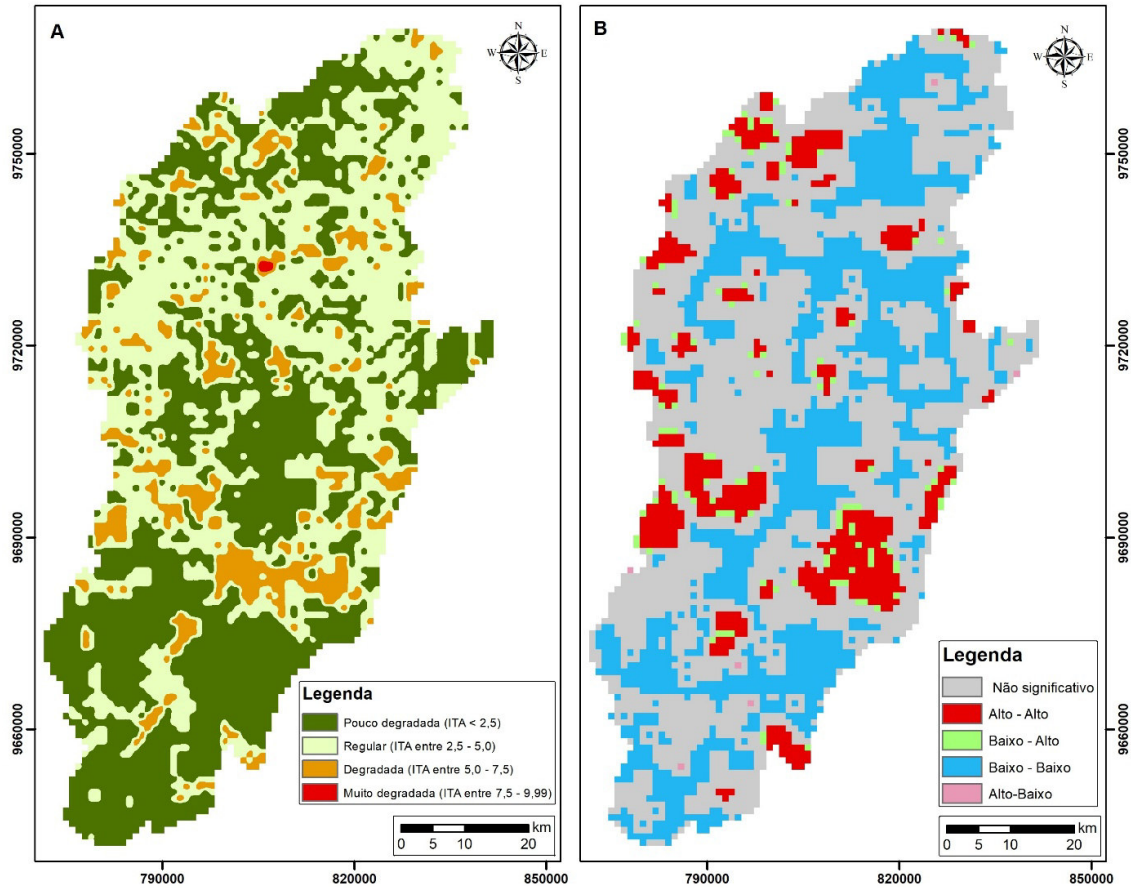
Fonte: Os autores (2026).

Estrutura espacial e determinantes da expansão

A espacialização do ITA revelou um gradiente de transformação no sentido dos setores central e norte (Figura 4A). O Índice de Moran Global de 0,566 ($p = 0,001$) confirmou forte dependência espacial da conversão, e os agrupamentos LISA Alto-Alto, interpretados como focos de conversão, concentraram-se nos mesmos setores (Figura 4B), indicando um fenômeno espacialmente estruturado.

A avaliação de multicolinearidade indicou VIF entre 1,6 e 2,5 (Tabela 4), com correlação de 0,57 entre distância às áreas antropizadas e distância da rede viária, atribuível à associação histórica entre ocupação e infraestrutura. O modelo global confirmou a distância das áreas antropizadas em 2010 como principal determinante, com coeficiente negativo e altamente significativo ($p < 0,0001$) nos três limiares: quanto menor a distância ao já antropizado, maior a probabilidade de expansão, em consonância com a hipótese de contágio. A declividade apresentou efeito significativo, porém de magnitude reduzida. O poder explicativo manteve-se moderado (pseudo- R^2 entre 0,17 e 0,20).

FIGURA 4. (A) Distribuição espacial do ITA em Tomé-Açu (PA), 2024, em grade de 1 km, segundo Da Silva, Costa e Seabra (2023). (B) Indicadores Locais de Associação Espacial (LISA) da densidade de conversão de floresta em dendê; Índice de Moran Global = 0,566 ($p = 0,001$).



Fonte: Os autores (2026).

A GWR proporcionou ganho expressivo de ajuste em relação ao modelo global, com redução do AICc de 1.111 pontos, evidenciando a não estacionariedade espacial das relações (Tabela 4). Com largura de banda fixada em 600 vizinhos, o menor valor que assegurou a estabilidade dos coeficientes; larguras inferiores produziram coeficientes instáveis devido à separação perfeita e à multicolinearidade locais. Os coeficientes apresentaram variação espacial substancial, com o efeito de contágio significativo ($|t| > 1,96$) em 74% das células e coeficiente médio de $-7,85$ (Figura 5).

TABELA 4. Diagnóstico de multicolinearidade (VIF) e determinantes da expansão do dendê segundo o modelo global, a GWR e o *Random Forest* (variáveis padronizadas), por limiar. $n = 5.007$ células.

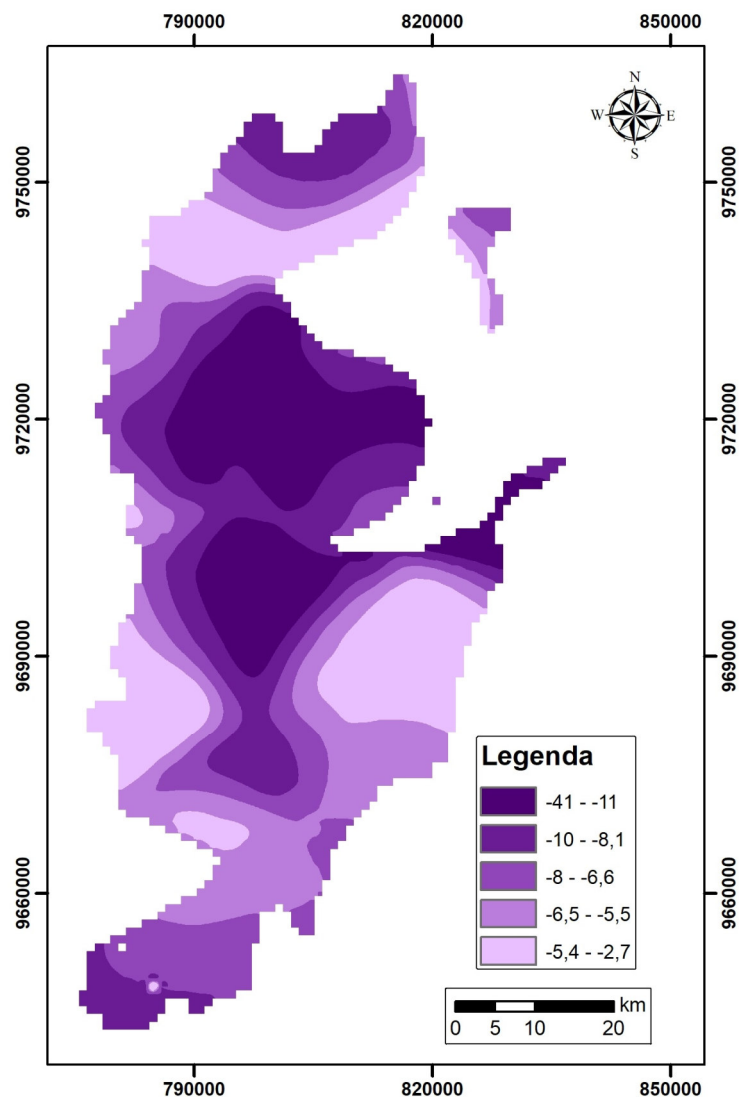
Parâmetro / Variável	VIF	$\geq 5\%$	$\geq 10\%$	$\geq 25\%$
Modelo global (regressão logística) — coeficiente β				
Dist. áreas antropizadas (2010)	1,92	$-5,100^{***}$	$-5,926^{***}$	$-9,388^{***}$
Distância da rede viária	2,53	$+0,238^{***}$	$+0,272^{***}$	$+0,390^{***}$
Declividade	1,62	$-0,355^{***}$	$-0,348^{***}$	$-0,347^{***}$
Pseudo- R^2	—	0,173	0,179	0,205
Células com expansão	—	807	720	531

GWR e Random Forest

GWR: largura de banda	600 vizinhos
GWR: redução de AICc vs global	$\Delta AICc = 1.111$
GWR: coeficiente médio do contágio	-7,85
GWR: contágio significativo ($ t > 1,96$)	74% das células
RF: AUC ($\geq 5\%$ / $\geq 10\%$ / $\geq 25\%$)	0,769 / 0,782 / 0,813
RF: importância, dist. áreas antropizadas	0,25
RF: importância, declividade	0,05
RF: importância, distância da rede viária	0,03

Fonte: Os autores (2026). *** $p < 0,001$.

FIGURA 5. Variação espacial do coeficiente local do efeito de contágio (distância das áreas antropizadas em 2010) na expansão do dendê, segundo a GWR. Apenas células com coeficiente significativo ($|t| > 1,96$).



Fonte: Os autores (2026).

A conversão indireta e a associação histórica com a perda florestal

Os resultados revelam dimensão frequentemente negligenciada com uma associação de longo prazo entre a supressão florestal pretérita e o estabelecimento do dendê, mediada por usos intermediários. A trajetória anual demonstrou que 72,4% da área cumulativamente ocupada por dendê ao longo da série (1985-2024) ocupam terrenos antes florestados, dos quais 78% por estados intermediários. Embora o dendê raramente substitua a floresta diretamente, grande parte da cultura ocupa terrenos cuja floresta foi suprimida em etapa anterior da cadeia produtiva.

Esse achado tem implicação metodológica, pois a análise por anos de corte capta uma associação entre floresta pretérita e dendê aproximadamente nove vezes menor do que a da trajetória anual, por não registrar as transições ocorridas entre os anos extremos. A dependência quase universal, na literatura sobre sensoriamento remoto, de matrizes entre anos de corte sugere que a associação entre dendê e perda florestal pode estar sistematicamente subestimada.

Caballero *et al.* (2023), ao corrigirem transições irreais nas séries do MapBiomas, demonstraram que a filtragem inadequada de conversões intermediárias comprometeu a quantificação da mudança de uso da terra no Brasil. A distinção entre responsabilidade direta e inserção em uma cadeia de conversão evita tanto a atribuição quanto a isenção indevida: o dendê não é o agente direto da maior parte do desmatamento, mas, ao valorizar terras já abertas, consolida e torna permanente a substituição da floresta, processo cujo custo ambiental, medido em perda de solo e nutrientes, é significativamente maior no dendê que em sistemas agroflorestais na mesma região (OLIVEIRA *et al.*, 2023). Esses sistemas agroflorestais, além do menor custo ambiental, prestam serviços ecossistêmicos cujo valor, estimado por meio de valoração contingente, supera o dos sistemas comerciais concorrentes, o que reforça a perda ambiental associada à substituição desses arranjos por monocultivos (OLIVEIRA *et al.*, 2020). Esse resultado encontra correspondência em abordagens distintas no estudo com 162 agricultores familiares do Nordeste Paraense; Silva e Navegantes-Alves (2017) identificaram uma sequência temporal semelhante (floresta, culturas anuais, pastagem, capoeira e, por fim, dendê).

O efeito de contágio e os limites da explicação espacial

A modelagem identificou, de forma convergente entre GWR e *Random Forest*, a proximidade às áreas antropizadas como fator espacial dominante. A expansão ocorre preferencialmente na vizinhança imediata de áreas já convertidas, configurando adensamento e expansão a partir de núcleos pré-existentes, e não abertura de frentes isoladas. A distância da rede viária, embora significativa no modelo global, apresentou coeficiente positivo nos três limiares (+0,238 a +0,390; Tabela 4), em sinal contrário ao esperado pelas hipóteses de acessibilidade. Duas interpretações, não mutuamente excludentes, contribuem para o resultado. A primeira remete ao efeito de supressão associado à correlação de 0,57 entre a distância da rede viária e a distância das áreas antropizadas: Como esta última capta parte substancial da variância explicada, o coeficiente residual das estradas passa a refletir o contraste local, favorecendo células afastadas da malha em contextos em que o adensamento já ocorreu. A segunda diz respeito à base cartográfica adotada, restrita à malha principal do município, que não abrange estradas vicinais e ramais internos abertos para o próprio cultivo, os quais tendem a acompanhar a expansão em vez de precedê-la.

A menor importância atribuída pelo *Random Forest* à variável (0,03, contra 0,25 do contágio) reforça a leitura de efeito secundário; ainda assim, a inclusão de uma base viária mais completa em versões futuras da análise permitirá qualificar melhor esse componente. A declividade também atuou como determinante de menor magnitude, coerente com a topografia amena do município.

A não estacionariedade revelada pela GWR demonstra que a intensidade do efeito varia no território, o que recomenda cautela na transposição de conclusões de escalas agregadas para o contexto local. Padrão semelhante de conversão concentrada no entorno imediato de áreas antropizadas foi identificado por Damiani *et al.* (2020) na Terra Indígena Turé-Mariquita, também em Tomé-Açu, onde 2.287,8 ha foram convertidos para dendeicultura entre 2008 e 2014, em um raio de 5 km dos limites da terra indígena, incluindo a supressão de 333,8 ha de floresta secundária em regeneração, utilizada pelos Tembés para caça e coleta.

O poder explicativo moderado dos modelos (pseudo- R^2 entre 0,17 e 0,20; AUC entre 0,77 e 0,83), longe de constituir fragilidade, é resultado substantivo: Os fatores espacializáveis explicam apenas uma parcela da expansão, cabendo à fração majoritária determinantes institucionais e econômicos não passíveis de espacialização direta. Silva e Navegantes-Alves (2017) identificaram, entre os fatores externos, as políticas federais para os agrocombustíveis, a linha de crédito para agricultores familiares e a chegada de empresas processadoras a partir de 2007, cujos contratos de integração asseguraram mercado e assistência técnica.

Somam-se a tudo já mencionado os determinantes internos, como a crise do sistema de corte e queima e os problemas fitossanitários das culturas tradicionais. A esses fatores soma-se, ainda, a relação de trabalho estabelecida na cadeia produtiva, na qual mulheres inseridas na agricultura familiar e no trabalho assalariado do dendê permanecem em posição subalternizada, com baixa remuneração e reduzido reconhecimento formal (FILGUEIRAS *et al.*, 2024). Tais fatores operam sobre o território sem se traduzirem em variáveis de localização, o que explica a variabilidade não capturada. Os modelos espaciais devem, assim, ser compreendidos como instrumentos de identificação de padrões de contiguidade, e não como explicações exaustivas de um fenômeno cuja governança é, em larga medida, extraterritorial.

CONCLUSÕES

A análise da dinâmica espaço-temporal do uso e cobertura da terra em Tomé-Açu, entre 1985 e 2024, permitiu compreender o processo de expansão da dendeicultura e sua relação com a transformação da paisagem. A expansão ocorreu predominantemente sobre áreas previamente antropizadas, tendo a pecuária, e não o dendê, constituído o principal fator direto de substituição da floresta. Contudo, a reconstituição da trajetória anual revelou que a maior parte do dendê se estabeleceu em terrenos antes florestados, majoritariamente em áreas que passaram por usos intermediários entre a supressão florestal e o estabelecimento da cultura. A análise por anos de corte não representa adequadamente essa relação, pois omite as conversões intermediárias, evidenciando a importância das séries anuais completas na quantificação das cadeias de conversão.

A modelagem confirmou o efeito de contágio da fronteira agropecuária, consolidado como fator dominante, corroborado de forma convergente pelos modelos GWR e *Random Forest*, com a distância da rede viária e a declividade como determinantes secundários. O poder explicativo moderado indica que a

expansão responde, em larga medida, a determinantes institucionais e econômicos que operam no território, sem se reduzir a variáveis de localização. Os resultados subsidiam o ordenamento territorial ao evidenciar que o monitoramento da expansão deve considerar a cadeia de conversão em sua totalidade, e não apenas a etapa final de estabelecimento da cultura, sendo o intervalo entre a supressão florestal e o plantio uma janela de oportunidade para ações de recuperação e controle.

REFERÊNCIAS

ANSELIN, L. Local indicators of spatial association, LISA. **Geographical Analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>. doi: 10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x

BARROS, P. H. B.; CHIMELI, A. B. The impacts of palm oil expansion on deforestation and economic activity in the eastern Amazon. **Ecological Economics**, v. 239, e108739, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2025.108739>. doi: 10.1016/j.ecolecon.2025.108739.

BARROS, P. H. B.; DIAS, F. G.; QUINTANILHA, J. A.; GROHMANN, C. H. Mapping oil palm expansion in the Eastern Amazon using optical and radar imagery. Remote Sensing Applications: **Society and Environment**, v. 38, e101506, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101506>. doi: 10.1016/j.rsase.2025.101506.

BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M. Análise florística e estrutural de sistemas silviagrícolas em Tomé-Açu, Pará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1139-1147, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000004>. doi: 10.1590/S0100-204X2011001000004

BRASIL. Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. **Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026**: Institui a Política de Integridade na Atividade Científica do CNPq. Brasília, DF: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, 2026. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-cnpq-n-2.664-de-6-de-marco-de-2026-691779232>. Acesso em: 26 abr. 2026.

BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>. doi: 10.1023/A:1010933404324

CABALLERO, C. B.; BIGGS, T. W.; VERGOPOLAN, N.; WEST, T. A. P.; RUHOFF, A. Transformation of Brazil's biomes: the dynamics and fate of agriculture and pasture expansion into native vegetation. **Science of the Total Environment**, v. 896, e166323, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166323>. doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.166323

CARVALHO, A. C. A.; NAHUM, J. S. Dendeicultura e migração em Tomé-Açu (Pará): o caso da Vila Forquilha. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 16, e8002, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.18764/2446-6549.2019.8002>. doi: 10.18764/2446-6549.2019.8002

DAMIANI, S.; SILVA, S. M. F. da; MONTALVÃO, M. T. L.; PASSOS, C. J. S. "Ficou só Chão e Céu": Dendeicultura e Impactos Socioambientais sobre Território Tembê na Amazônia. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 23, p. 1-24, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20190049r2vu2020L6AO>. doi: 10.1590/1809-4422asoc20190049r2vu2020L6AO

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S. et al. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, RG2004, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>. doi: 10.1029/2005RG000183

FEARNSIDE, P. M. (ed.). **Destruição e conservação da floresta amazônica**. Manaus: Editora do INPA, 2022. 356 p. ISBN 978-85-211-0193-2.

FILGUEIRAS, T. C. G. M.; JACOB, V.; MIRANDA, C.S. C.; GONÇALVES, N. V.; SANTOS, A. C.; *et al.*; As trabalhadoras do dendê: uma análise sobre o trabalho da mulher na cadeia produtiva do dendê. **Revista Caribeña de Ciencias Sociales**, Miami, v. 13, n. 2, p. 1-23, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/rcssv13n2-029>. doi: 10.55905/rcssv13n2-029

FOTHERINGHAM, A. S.; BRUNSDON, C.; CHARLTON, M. **Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships**. Chichester: John Wiley & Sons, 2002.

HOMMA, A. K. O. (ed.). **Sinergias de mudança da agricultura amazônica: conflitos e oportunidades**. Brasília, DF: Embrapa, 2022. 487 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Tomé-Açu (PA): panorama. Rio de Janeiro: IBGE, 2025**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/tome-acu/panorama>. Acesso em: 12 ago. 2026.

NAHUM, J. S.; SANTOS, C. B. Formação dos projetos de agricultura familiar com dendezeiro na Amazônia paraense. Campo-Território: **Revista de Geografia Agrária**, Uberlândia, v. 17, n. 46, p. 201-222, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.14393/RCT174609>. doi: 10.14393/RCT174609.

NAHUM, J. S.; SANTOS, L. S.; SANTOS, C. B. dos. Formação da dendeicultura na Amazônia paraense. **Mercator**, Fortaleza, v. 19, e19007, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4215/rm2020.e19007>. doi: 10.4215/rm2020.e19007

OLIVEIRA, G. M. T. S.; OLIVEIRA, E. S.; SANTANA, A. C.; SANTOS, D. N. O passivo ambiental da perda de nutrientes causado por erosão de solos nos usos múltiplos de uma propriedade rural na Amazônia Oriental. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 16, n. 7, e1076, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55905/revconv.16n.7-215>. doi: 10.55905/revconv.16n.7-215

OLIVEIRA, G. M. T.S.; SANTANA, A. C.; OLIVEIRA, E. S.; SILVA, R. J.; SANTOS, W. A. S.; *et al.*; The value of agroforestry ecosystem services provided in rural communities in the Eastern Amazon (Tomé-Açu – PA, Brazil). **Journal of ENCICLOPÉDIA BIOSFERA**, Centro Científico Conhecer – Jandaia-GO, v.23 n.57; p.98 2026

Agricultural Studies, v. 8, n. 4, p. 203-216, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5296/jas.v8i4.17338>. doi: 10.5296/jas.v8i4.17338

OSHAN, T. M.; LI, Z.; KANG, W.; WOLF, L. J.; FOTHERINGHAM, A. S. mgwr: A Python implementation of multiscale geographically weighted regression for investigating process spatial heterogeneity and scale. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 6, 269, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi8060269>. doi: 10.3390/ijgi8060269

RAMALHO FILHO, A.; MOTTA, P. E. F.; FREITAS, P. L.; TEIXEIRA, W. G. (org.). **Zoneamento agroecológico, produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010. 216 p.

SILVA, E. M.; NAVEGANTES-ALVES, L.F. Transformações nos sistemas de produção familiares diante da implantação do cultivo de dendê na Amazônia Oriental. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 40, p. 345-364, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/dma.v40i0.47330>. doi: 10.5380/dma.v40i0.47330

SILVA, P. N.; COSTA, E. C. P.; SEABRA, V. S. Índice de Transformação Antrópica por unidades de paisagem na bacia do Macacu-Guapiaçu, RJ. **Revista Tamoios**, v. 19, n. 2, p. 24-44, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.12957/tamoios.2023.71054>. doi: 10.12957/tamoios.2023.71054

SOUZA JUNIOR., C. M.; Z. SHIMBO, J.; ROSA, M. R.; PARENTE, L. L.; ALENCAR, A. A.; *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, 2735, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs12172735>. doi: 10.3390/rs12172735