







Transformações no uso da terra e impactos ambientais na região do arco do desmatamento na Amazônia: O caso de Santana do Araguaia (Pará)

Douglas Silva dos Santos¹^{*}, Camila de Cássia do Socorro da Silva², Luana Costa da Silva³, André Felipe de Moraes Marques⁴, Manoel Tavares de Paula⁵, Altem Nascimento Pontes⁶

¹ *Doutorando em Ciência Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Brasil. (*Autor correspondente: eng.douglassantos60@hotmail.com)*

² *Doutoranda em Ciência Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Brasil.*

³ *Mestra em Ciência Ambientais, Instituto Tecnológico Vale, Brasil.*

⁴ *Mestrando em Ciência Ambientais, Universidade do Estado do Pará, Brasil.*

⁵ *Doutor Ciências Agrárias, docente na Universidade do Estado do Pará, Brasil.*

⁶ *Doutor em Física, docente na Universidade do Estado do Pará, Brasil.*

Histórico do Artigo: Submetido em: 15/04/2026 – Revisado em: 12/05/2026 – Aceito em: 25/06/2026

RESUMO

A Floresta Amazônica possui importância global devido à sua biodiversidade, ao papel na manutenção do ciclo hidrológico e à influência no clima, porém, vem sofrendo fortes pressões, especialmente na região do arco do desmatamento. Assim, este trabalho teve como objetivo realizar uma análise temporal das mudanças na cobertura do solo no município de Santana do Araguaia, discutindo os principais impactos ambientais associados a essas transformações. Os dados utilizados foram obtidos na plataforma MapBiomas e referem-se à extensão das áreas de vegetação nativa, usos antrópicos, áreas desmatadas e queimadas, abrangendo uma série temporal de 38 anos (1985–2023). Os resultados evidenciam a perda progressiva da vegetação natural, de modo que, entre 2005 e 2010, aproximadamente metade da cobertura vegetal nativa foi convertida para usos do solo associados à ação humana. As principais classes de uso antrópico do solo identificadas corresponderam à agropecuária, com destaque para as áreas de pastagem e para a expansão da lavoura de soja, que passou a se consolidar como a cultura predominante em 2015, possivelmente contribuindo para o avanço do desmatamento e da ocorrência de queimadas na região. As áreas destinadas à mineração configuraram outra classe de uso do solo relevante, com aumento expressivo observado a partir de 2018. Neste contexto, percebeu-se que as áreas urbanizadas exerceram baixa influência nas transformações recentes do uso da terra no município, sendo o avanço da fronteira agropastoril sobre remanescentes de vegetação nativa, associado à ocorrência de queimadas, os aspectos mais evidentes na discussão dos impactos ambientais em Santana do Araguaia.

Palavras-Chaves Agropecuária, Cobertura do solo, Soja, Queimadas.

Land Use Transformations and Environmental Impacts in the Amazon Deforestation Arc: The Case of Santana do Araguaia (Pará)

ABSTRACT

The Amazon Forest holds global importance due to its biodiversity, its role in maintaining the hydrological cycle, and its influence on climate. However, it has been subjected to intense pressures, particularly in the so-called arc of deforestation. In this context, this study aimed to conduct a temporal analysis of land cover changes in the municipality of Santana do Araguaia, discussing the main environmental impacts associated with these transformations. The data used were obtained from the MapBiomas platform and refer to the extent of native vegetation, anthropogenic land uses, deforested areas, and burned areas, covering a 38-year time series (1985–2023). The results reveal a progressive loss of natural vegetation, such that between 2005 and 2010 approximately half of the native vegetation cover was converted into human-associated land uses. The main classes of anthropogenic land use identified correspond to agriculture and livestock activities, especially pasture areas and the expansion of soybean cultivation, which became established as the predominant crop from 2015 onward, possibly contributing to the advancement of deforestation and the occurrence of wildfires in the region. Mining areas constituted another relevant land use class, with a significant increase observed from 2018 onward. In this context, urbanized areas were found to have a relatively low influence on recent land use transformations in the municipality, whereas the expansion of the agropastoral frontier over remaining native vegetation, associated with the occurrence of fires, represents the most evident aspect in the discussion of environmental impacts in Santana do Araguaia.

Keywords: Agriculture and livestock, Land cover, Soybean, Wildfires.

Santos, D. S. dos, Silva, C. de C. do S. da, Silva, L. C. da, Marques, A. F. de M., Paula, M. T. de, & Pontes, A. N. (2026). Transformações no uso da terra e impactos ambientais na região do arco do desmatamento na Amazônia: O caso de Santana do Araguaia (Pará). *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 14(3), 79–99..



Transformaciones en el uso de la tierra e impactos ambientales en la región del arco de deforestación en la Amazonía: el caso de Santana do Araguaia (Pará)

RESUMEN

La selva amazónica posee importancia global debido a su biodiversidad, su papel en el mantenimiento del ciclo hidrológico y su influencia en el clima; sin embargo, ha sido sometida a fuertes presiones, especialmente en la región del denominado arco de deforestación. En este contexto, el presente estudio tuvo como objetivo realizar un análisis temporal de los cambios en la cobertura del suelo en el municipio de Santana do Araguaia, discutiendo los principales impactos ambientales asociados a estas transformaciones. Los datos utilizados fueron obtenidos de la plataforma MapBiomas y se refieren a la extensión de áreas de vegetación nativa, usos antrópicos del suelo, áreas deforestadas y áreas quemadas, abarcando una serie temporal de 38 años (1985–2023). Los resultados evidencian una pérdida progresiva de la vegetación natural, de modo que, entre 2005 y 2010, aproximadamente la mitad de la cobertura vegetal nativa fue convertida a usos del suelo asociados a la acción humana. Las principales clases de uso antrópico del suelo identificadas correspondieron a actividades agropecuarias, con destaque para las áreas de pastizales y la expansión del cultivo de soja, que se consolidó como el cultivo predominante a partir de 2015, pudiendo haber contribuido al avance de la deforestación y al incremento de la ocurrencia de incendios en la región. Las áreas destinadas a la minería configuraron otra clase relevante de uso del suelo, con un aumento significativo observado a partir de 2018. En este contexto, se observó que las áreas urbanizadas ejercieron baja influencia en las transformaciones recientes del uso de la tierra en el municipio, siendo la expansión de la frontera agropastoril sobre remanentes de vegetación nativa, asociada a la ocurrencia de incendios, el aspecto más evidente en la discusión de los impactos ambientales en Santana do Araguaia.

Palabras clave: Agropecuaria, Cobertura del suelo, Soja, Incendios.

1. Introdução

A urbanização e a crescente demanda por alimentos têm contribuído para a redução significativa dos ecossistemas naturais em todo o planeta (Hasan, Sarmin e Miah, 2020; Nayak; Mandal, 2019). Essas formações naturais são constituídas predominantemente por coberturas arbóreas (27,7%), coberturas arbustivas (9,5%), vegetação herbácea (1,3%), vegetação esparsa (7,7%), manguezais (0,1%), áreas cobertas por neve e geleiras (9,7%) e águas interiores superficiais (2,6%). Os usos antrópicos da terra, por sua vez, correspondem às áreas agrícolas (12,6%), áreas de pastagens (13%), solos expostos (15,2%) e superfícies artificiais (0,6%) (FAO, 2015; Vilela et al., 2021).

As mudanças no uso e cobertura do solo são resultantes da substituição de áreas naturais por áreas de uso antrópico, e normalmente geram impactos climáticos de magnitude regional, pois provocam alterações drásticas na superfície, como o albedo, a rugosidade, o índice de área foliar e a evapotranspiração potencial, interferindo na troca de energia e umidade entre a superfície terrestre e a atmosfera (Nayak; Mandal, 2019; Hasan, Sarmin, Miah, 2020). Essas mudanças também intensificam os fluxos de gases de efeito estufa, contribuindo para o desequilíbrio climático global. (Kabir et al., 2023; Nunes, 2023; Yurak et al., 2025).

A manutenção da vegetação nativa, sobretudo das florestas, configura-se como uma estratégia viável de mitigação das mudanças climáticas (Psistaki, Tsantopoulos, Paschalidou, 2024), pois esses ecossistemas apresentam elevada capacidade de armazenamento de carbono na biomassa viva (parte aérea e raízes), na matéria orgânica morta (resíduos vegetais e serapilheira) e no Carbono Orgânico do Solo (COS) (Carvalho, Quartucci, Maria, 2022). Apesar disso, estima-se que cerca de 80% das florestas que recobrem a superfície terrestre já tenham sido impactadas por desmatamento, fragmentação ou degradação (Carvalho, Quartucci, Maria, 2022; Souza et al., 2024; Mandal & Banik, 2025).

O sequestro de carbono nos ecossistemas florestais ocorre por meio da fotossíntese. Nesse processo, o CO₂ é incorporado à biomassa vegetal (Khan & Dhadse, 2025). No solo, o carbono tem como principais fontes a matéria orgânica morta não decomposta, que se acumula na superfície, e os exsudatos radiculares e fragmentos de raízes em diferentes profundidades (Panchal et al., 2022). Essas fontes são degradadas pelos microrganismos do solo até serem transformadas em huminas, ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, que são

biomoléculas estáveis que desempenham papel fundamental no estoque de carbono e na formação dos agregados do solo (Carvalho, Quartucci, Maria, 2022; Feng et al., 2024.a; Piccolo & Drosos, 2025).

Diante desse cenário, as preocupações relacionadas à dinâmica da cobertura da terra na Amazônia intensificam-se. A Floresta Amazônica possui relevância global em razão de sua elevada biodiversidade e da magnitude dos serviços ecossistêmicos que presta, sendo fundamental para a manutenção do ciclo hidrológico e para a regulação das mudanças climáticas (Leal Filho et al., 2025), uma vez que seus solos atuam como importantes sumidouros de carbono (Barbino et al., 2021). Entretanto, as formações naturais do bioma têm sido submetidas a intensas pressões nos últimos anos (Jaramillo, 2023), sobretudo em decorrência do desmatamento voltado à extração madeireira e à expansão das atividades agropecuárias (Barbino et al., 2021; Dar et al., 2022; Albert et al., 2023).

A supressão da vegetação nativa na Amazônia origina outro problema ambiental, as queimadas, historicamente empregadas desde o período dos povos tradicionais ao longo de milênios (Barbino et al., 2021; Feldpausch et al., 2022; Bilbao et al., 2025). O fogo é frequentemente utilizado como alternativa econômica para a remoção da biomassa remanescente da derrubada da floresta, pois essa prática apresenta um custo financeiro significativamente menor do que os métodos convencionais que empregam maquinário (Reis; Leal, 2020).

Nesse contexto, destaca-se a região conhecida como Arco do Desmatamento, que compreende uma extensa faixa ao sul e leste da Amazônia Legal, abrangendo áreas dos estados do Maranhão, Pará, Mato Grosso, Tocantins e Rondônia. Essa região é caracterizada por intensa dinâmica de transformação do uso da terra, marcada pela expansão da fronteira agropecuária, elevados índices de desmatamento e recorrentes conflitos socioambientais, configurando-se como a principal zona de pressão antrópica sobre o bioma amazônico (Sauer, 2018; Antelo; Michelotti; Contente, 2021; Ferreira et al., 2025).

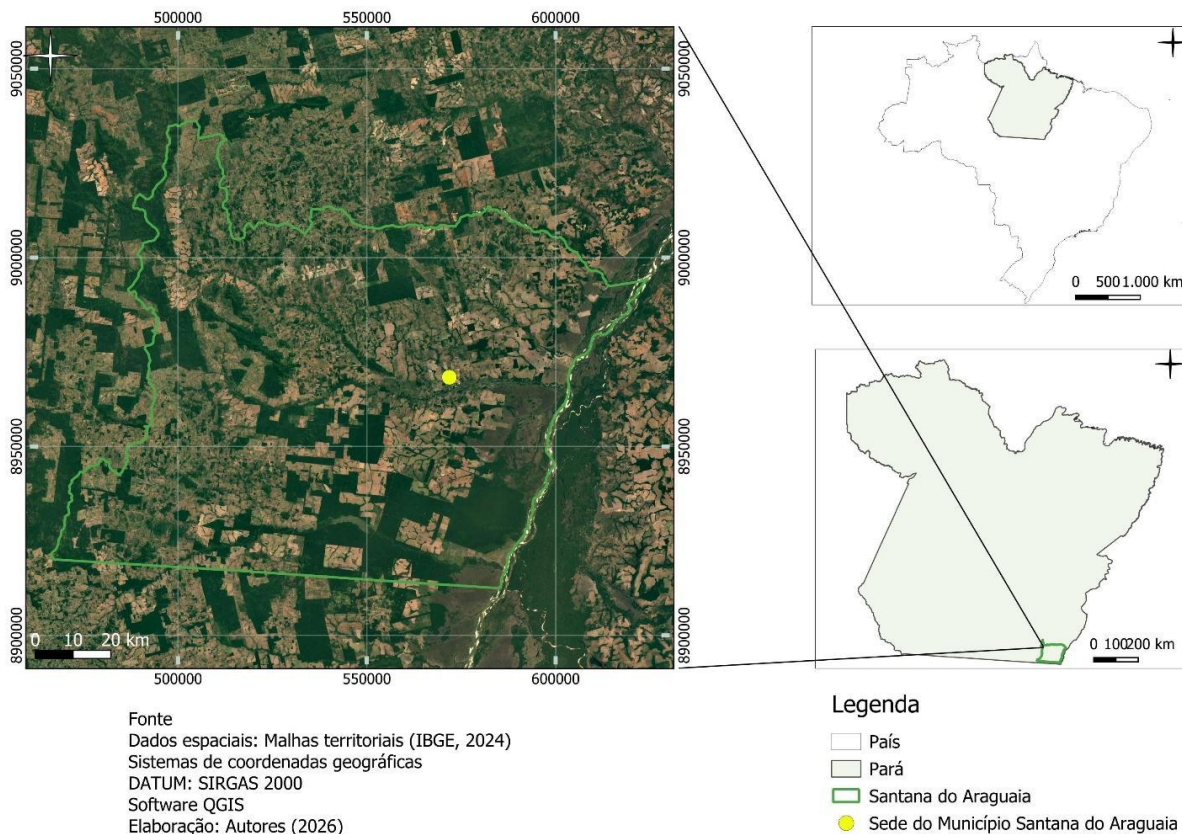
Inserido nesse contexto regional, o município de Santana do Araguaia, localizado no sul do estado do Pará, representa um caso emblemático dessas transformações, por situar-se em uma área de transição entre os biomas Amazônia e Cerrado e em uma zona de expansão agropecuária interestadual. Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo realizar uma análise temporal das mudanças no uso e cobertura da terra no município de Santana do Araguaia, evidenciando os principais impactos ambientais associados a essas transformações.

2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

O município de Santana do Araguaia (9° 18' 0" S; 50° 6' 0" W) é um município que integra a mesorregião Sudeste do Pará, estando está localizado a 1.061 km da capital Belém, faz fronteira com os Estados do Tocantins e Mato Grosso, (FAPESPA, 2023) (Figura 1).

Figura 1 – Mapa de localização do município de Santana do Araguaia-PA.
 Figure 1 – Location map of the municipality of Santana do Araguaia, Pará (PA).



Fonte: Autores (2025).
 Source: Authors (2025).

O município possui extensão territorial de 11.591,44 km² e sua população em 2022 era de 32.413 habitantes (IBGE, 2024). A precipitação anual é em torno de 2.000 mm, e o clima é classificado como tropical com estação seca (clima de savana), tipo Aw, segundo a classificação de Köppen-Geiger, apresentando os meses de julho, agosto, setembro e outubro como época de estiagem (FAPESPA, 2023). A temperatura média anual é em torno de 26,6°C e a média mensal varia de 21,9°C a 34,8°C dependendo da estação (CDO, 2024).

Com altitude média de 250 metros na sede municipal, podendo atingir até 700 metros nas áreas mais elevadas, a hidrografia local é predominada pelos rios e afluentes da bacia hidrográfica do rio Araguaia. As ordens de solos que podem ser encontrados nesta região são plintossolo, latossolo, argissolo, onde a cobertura vegetal nativa do município inclui floresta tropical ombrófila (bioma amazônico), savanas (bioma cerrado), compostas por árvores pequenas e arbustos espalhados, com troncos retorcidos e de coloração acinzentada, além de campos naturais (FAPESPA, 2023).

2.2 Coleta de dados

Os dados utilizados neste trabalho são de natureza secundária e referem-se à cobertura e uso da terra, ao desmatamento e às queimadas no município de Santana do Araguaia, abrangendo uma série temporal de 38 anos (1985–2023). Esses dados foram obtidos a partir da plataforma MapBiomias (Coleção 9), resultante da

classificação de imagens multiespectrais com resolução espacial de 30 metros, oriundas do satélite Landsat (Souza et al., 2020).

O Projeto de Mapeamento Anual da Cobertura e Uso do Solo no Brasil (MapBiomas) consiste em uma iniciativa colaborativa coordenada pelo Instituto de Pesquisas Ambientais da Amazônia (IPAM) e pela Universidade de São Paulo (USP), reunindo diversas instituições e pesquisadores. O projeto tem como objetivo monitorar e mapear a cobertura e o uso da terra no Brasil por meio de técnicas de sensoriamento remoto, utilizando a plataforma Google Earth Engine e, predominantemente, imagens do programa Landsat (Gonçalves; Ribeiro, 2021).

As classes de uso e cobertura da terra disponibilizadas pelo MapBiomas estão organizadas em dois grandes grupos: uso natural e uso antrópico, conforme apresentado no Quadro 1.

Uso natural	I) Formação Florestal; II) Formação Savânica; III) Mangue; IV) Restinga Arbórea; V) Campo Alagado e Área Pantanosa; VI) Formação Campestre; VII) Restinga Herbácea; VIII) Apicum; IX) Praia, Duna e Areal; X) Afloramento Rochoso; e XI) Rio, Lago e Oceano.
Uso antrópico	I) Pastagem; II) Soja; III) Cana-de-açúcar; III) Arroz; IV) Algodão; V) Outras Lavouras Temporárias; VI) Café; VII) Citrus; VIII) Dendê; IX) Outras Lavouras Perenes; X) Silvicultura; XI) Área Urbanizada; XII) Mineração; e XIII) Aquicultura.

2.3 Tratamento e análise de dados

Todas as análises foram realizadas com base em dados secundários disponibilizados pela plataforma MapBiomas. Os dados obtidos foram organizados em planilhas eletrônicas, com o objetivo de estruturar uma base de dados temporal das classes de uso e cobertura da terra no período de 1985 a 2023. A partir dessa sistematização, foram calculadas taxas de mudança entre períodos distintos da série histórica, permitindo identificar padrões de transformação do uso da terra. Dessa forma, a abordagem metodológica adotada caracteriza-se como quantitativa, de natureza descritiva e exploratória, com ênfase na análise temporal das classes de uso e cobertura da terra.

As análises realizadas possibilitaram identificar tendências de expansão e retração das classes de uso do solo, especialmente relacionadas à vegetação nativa e aos usos antrópicos. Foram elaboradas séries temporais e gráficos para a visualização da dinâmica de transformação da paisagem e a identificação dos principais vetores de mudança no território analisado. A interpretação dos resultados foi realizada à luz da literatura científica, buscando discorrer sobre os impactos ambientais relacionados às mudanças observadas das transformações averiguadas no uso do solo.

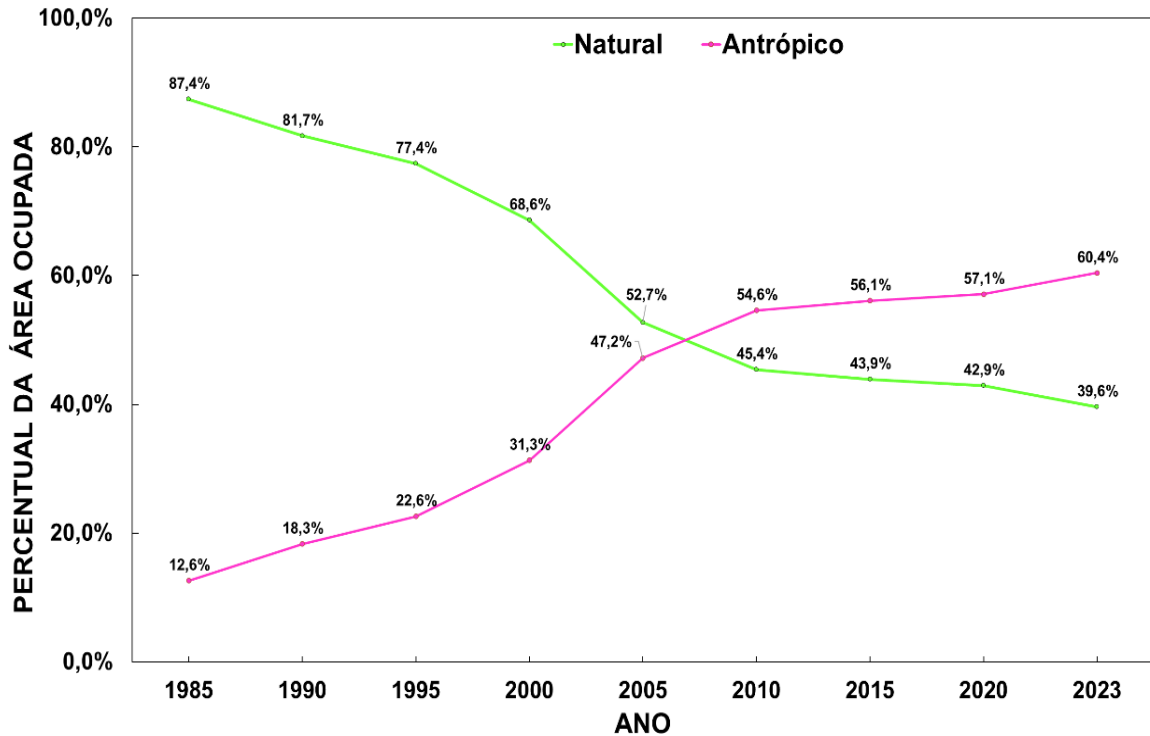
3. Resultados e Discussão

3.1 Dinâmica da vegetação nativa e desmatamento

A partir da análise da série temporal e das variações percentuais das classes de uso da terra, os resultados evidenciam uma redução progressiva da vegetação nativa ao longo da série histórica, de tal forma que, entre os anos de 2005 e 2010, cerca de metade da vegetação nativa do município foi substituída por formas de uso antrópicos, esse padrão indica a intensificação dos processos de desmatamento associados à expansão das atividades agropecuárias na região. (Figura 2).

Figura 2 – Porção do território ocupada por vegetação nativa e áreas antropizadas no município de Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).

Figure 2 – Proportion of the territory occupied by native vegetation and anthropized areas in the municipality of Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).



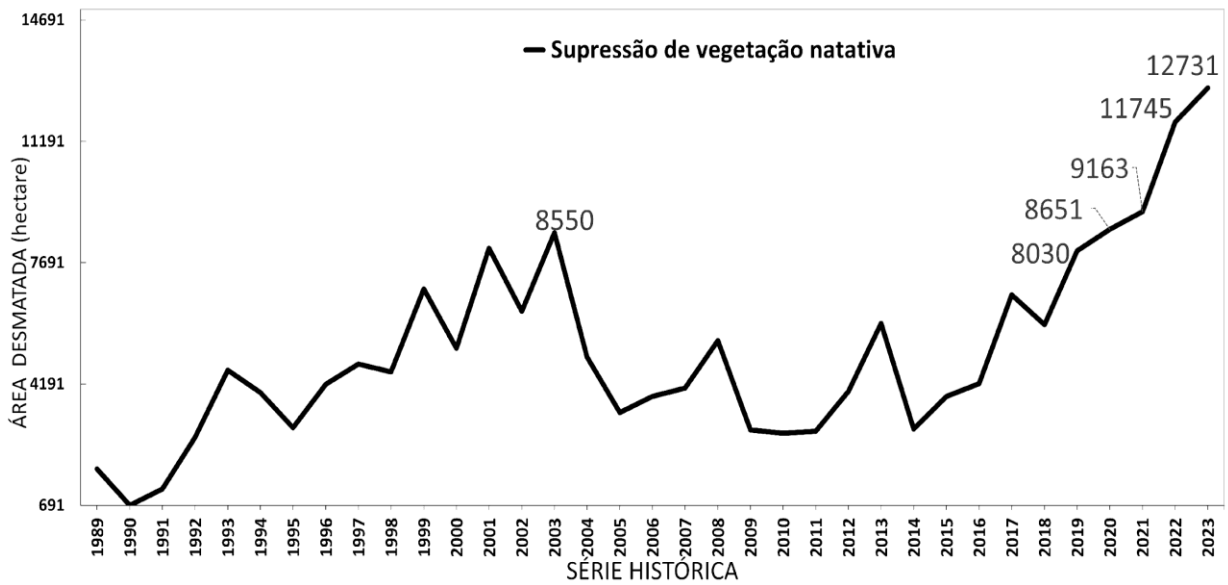
Fonte: MapBiomias (2024).
Source: MapBiomias (2024).

A Figura 2 evidencia a redução progressiva da vegetação nativa ao longo da série histórica, indicando a intensificação dos processos de desmatamento no município, entre 1985 e 2023 o município de Santana do Araguaia apresentou uma mudança expressiva na configuração de seu território, marcada pela redução contínua da vegetação nativa e pela expansão das áreas antrópicas. Em 1985, as formações naturais ocupavam 87,4% do território, enquanto as áreas sob uso antrópico correspondiam a 12,6%. Ao longo das décadas, observa-se uma inversão gradual desse cenário, com destaque para o período entre 2000 e 2010, quando se verifica a transição mais acentuada. Esse padrão reflete a pressão exercida pela expansão das atividades agropecuárias na região.

Em 2023, a cobertura natural passa a representar 39,6% da área municipal, ao passo que as áreas antrópicas alcançam 60,4%, evidenciando um processo consolidado de transformação da paisagem, marcado pela predominância dos sistemas antrópicos sobre a cobertura natural, associado à expansão das atividades agrícolas e, sobretudo, da pecuária (Almeida et al., 2016; Sadeck; Ferreira Filho; Beltrão, 2025). Esta situação ocorre devido a crescente demanda nacional e internacional pelas *commodities* agrícolas (Haddad, 2024), onde a pecuária bovina se configura como uma das principais bases econômicas do sul do estado do Pará, contribuindo para a intensificação do uso produtivo do território (Candino et al., 2024).

Nesse sentido, a Figura 3 evidencia que a área anual de vegetação nativa suprimida no município de Santana do Araguaia apresentou comportamento oscilatório entre 1989 e 2018, com variações significativas ao longo da série histórica.

Figura 3 – Área total de vegetação nativa suprimida no município de Santana do Araguaia, Pará (1989–2023).
 Figure 3 – Total area of native vegetation suppressed in the municipality of Santana do Araguaia, Pará (1989–2023).



Fonte: MapBiomias (2024).
 Source: MapBiomias (2024).

Verifica-se que o menor valor foi registrado em 1990, com 691 hectares desmatados, enquanto o pico anterior ocorreu em 2003, quando a supressão atingiu 8.550 hectares. Após esse período, observa-se uma fase de relativa instabilidade, alternando aumentos e reduções anuais. Contudo, a partir de 2019 observa-se uma tendência contínua de crescimento do desmatamento, demonstrando um novo ciclo de intensificação. Em 2020, a área suprimida alcançou 8.651 hectares, superando o recorde anterior, sendo novamente ultrapassada em 2021 (9.163 ha), 2022 (11.745 ha) e 2023 (12.731 ha), o que indica um processo recente de aceleração da perda de cobertura vegetal no município.

Embora a expansão das atividades agropecuárias no território de Santana do Araguaia tenha promovido considerável crescimento econômico, esse processo ocorreu de forma desordenada e não viabilizou a conservação dos recursos naturais nem a manutenção da vegetação nativa (Sadeck; Ferreira Filho; Beltrão, 2025). Esse fato evidencia que o progresso econômico observado no município provavelmente não tem evoluído em consonância com a sustentabilidade, uma vez que o desenvolvimento sustentável preconiza que o crescimento das atividades econômicas deve ocorrer de forma a garantir o uso racional dos recursos naturais, sem comprometer o acesso das futuras gerações (Wang; Juo, 2021).

A Tabela 1 mostra a composição da vegetação natural do município: formação florestal, vegetação savânica e formações não florestais, como campos alagados, áreas pantanosas e formações campestres.

Tabela 1 – Tamanho da vegetação nativa suprimida anualmente no município de Santana do Araguaia (1985–2023).
 Table 1 – Annual extent of native vegetation suppressed in the municipality of Santana do Araguaia (1985–2023).

Supressão da vegetação natural (hectare)						
Ano	Floresta nativa	Floresta secundária	Floresta alagável	Vegetação savânica	Formações não florestais	TOTAL
1990	306	346	24	7	8	691
1995	1197	1467	101	65	103	2933

2000	2207	2611	191	103	109	5221
2005	1424	1683	74	116	67	3364
2010	915	1385	203	126	140	2769
2015	1444	1916	160	183	129	3832
2020	3514	4326	431	170	210	8651
2023	5611	6366	622	18	114	12731

Fonte: MapBiomias (2024).

Source: MapBiomias (2024).

É possível constatar que o desmatamento em Santana do Araguaia ocorre predominantemente em áreas de vegetação florestal, fato explicado pela predominância desse tipo de cobertura no município, enquanto as demais formações vegetais contribuem pouco para o montante anual de supressão. Dessa forma, o desmatamento da vegetação nativa para ocupação antrópica na Amazônia incide em maior proporção sobre áreas de formação florestal (Berenguer et al., 2024), sejam elas nativas, secundárias ou de várzea, conforme apresentado na Tabela 1. Além disso, destacam que as formações florestais sofrem maior pressão antrópica pelo forte interesse comercial na extração da madeira, algo que não ocorre em campos e savanas (Smith; Freitas; Mistry, 2024).

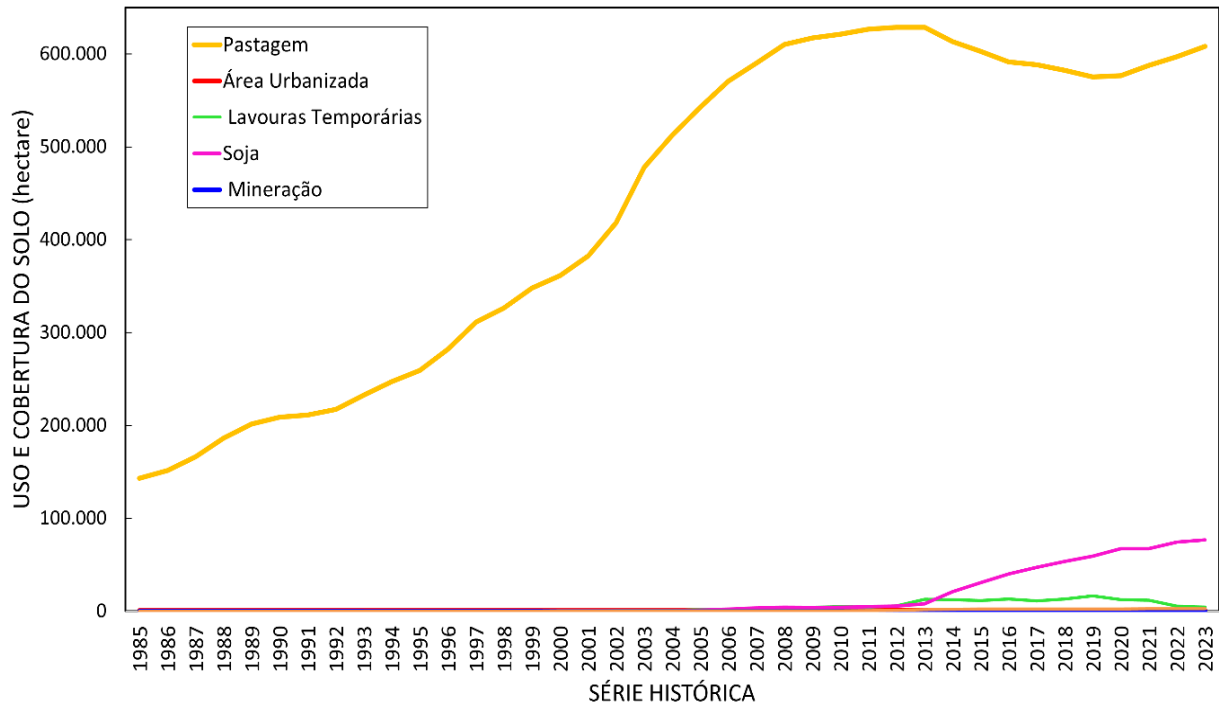
A destruição dos ecossistemas naturais causa perda de habitat e reduz a biodiversidade da flora e da fauna, podendo comprometer diversos serviços ecossistêmicos, tais como polinização, dispersão de sementes, controle de pragas, regulação climática, ciclagem de nutrientes, infiltração da água e abastecimento hídrico (Maza et al., 2025). Este fato oferece risco à existência de determinadas espécies animais, como onça-pintada e ariranhas (Díaz-Vaquero et al., 2024), e espécies vegetais como o mogno e o cedro encontram-se entre as mais afetadas pela exploração florestal (Anand; Sreedevi; Swapna, 2023).

Áreas próximas de estradas e rios são zonas preferenciais para o desmatamento, estando mais propensas à devastação (Damania et al., 2018; Araújo; Assunção; Bragança, 2025; Shabani et al., 2025). Neste sentido, o desmatamento também pode comprometer a hidrologia regional, uma vez que a supressão da cobertura florestal reduz significativamente a evapotranspiração e o lançamento de vapor d'água para a atmosfera, processos fundamentais para a regulação do regime de chuvas e o equilíbrio climático (Feng et al., 2024.b). Gerson et al. (2022) corroboram que regiões que apresentam florestas densas apresentam maiores índices pluviométricos, fato que é possível por causa umidade proveniente da vegetação (Mehmood et al., 2025). Outro serviço ecossistêmico desempenhado pelas florestas é a sua atuação como sumidouros de carbono, de modo que o desmatamento resulta na liberação de CO₂ para a atmosfera, contribuindo para a intensificação do efeito estufa (Nzabarinda et al., 2025; Panja, 2021; Ruv Lemes et al., 2023).

No que concerne ao tamanho das classes de uso antrópico do solo, observou-se a predominância de áreas destinadas à pastagem e ao cultivo agrícola em Santana do Araguaia. A pastagem esteve presente desde o início da série histórica, atingindo 608.092 hectares em 2023. O cultivo da soja, por sua vez, teve início no município no ano 2000, com apenas 46 hectares plantados, mas passou a se destacar a partir de 2014, quando atingiu 20.859 hectares, chegando a 76.734 hectares em 2023. As classes de cobertura da terra caracterizadas como áreas urbanizadas, lavouras temporárias e áreas de exploração mineral foram verificadas em menor proporção (Figura 4)

Figura 4 –Evolução da área de cobertura do solo ocupada por uso antrópico em Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).

Figure 4 – Evolution of land cover area occupied by anthropogenic use in Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).



Fonte: MapBiomias (2024).

Source: MapBiomias (2024).

A predominância das áreas de pastagem observada na Figura 4 indica a consolidação da pecuária como principal vetor de transformação da paisagem no município. Esse padrão é amplamente documentado na Amazônia brasileira, onde a conversão de vegetação nativa em pastagens constitui a etapa inicial do avanço da fronteira agropecuária, frequentemente associada ao aumento das taxas de desmatamento e à ocorrência de queimadas.

3.2 Expansão da agropecuária e mudanças no uso da terra

A silvicultura se faz presente como uma classe de uso da terra observada no município de Santana do Araguaia, porém em escala significativamente menor, com registros a partir de 1988, quando ocupava apenas 2 hectares, alcançando 2.787 hectares em 2023. Quanto às áreas destinadas a lavouras temporárias, não foram identificadas como a de cana-de-açúcar, arroz e algodão, nem as lavouras perenes de café, citros e dendê.

A mudança no uso do solo de maior impacto tem sido por consequência de atividades de agropecuária (Nguyen et al., 2023). Essa é a realidade de diversos municípios brasileiros, uma vez que o país figura entre os maiores produtores de alimentos do mundo, o que tem impulsionado o desmatamento nos biomas brasileiros, especialmente na Amazônia (Donoso et al., 2024; Correia et al., 2025; Justino et al., 2025). Desta forma, a Amazônia tem apresentado intenso desmatamento ao longo dos anos (Cabral et al., 2024), apresentando 13% de perda do bioma amazônico para o desenvolvimento de atividades antrópicas (Bowman et al., 2022), principalmente a pecuária (Monteiro et al., 2024).

A predominância das áreas de pastagem observada na Figura 4 indica a consolidação da pecuária como principal vetor de transformação da paisagem no município. Tradicionalmente, a pastagem é a paisagem predominante em Santana do Araguaia (Oliveira et al., 2023), podendo estar contribuindo de forma significativa para o aumento do desmatamento e para os recortes de áreas de vegetação nativa suprimida no município nos últimos três anos da série histórica (Ferreira et al., 2025). Esse padrão está associado à dinâmica de ocupação da fronteira agropecuária, na qual a conversão de áreas florestais em pastagens representa uma etapa inicial do processo produtivo.

Sobre a expansão das áreas destinadas à agropecuária, Zalles et al. (2019) utilizaram séries históricas de imagens de satélite para estudar a dinâmica da terra no Brasil. Os autores corroboram um crescimento no avanço das áreas de pasto em direção a áreas com vegetação natural, registrando que, entre os anos de 2000 e 2014, cerca de 20% dessas áreas tiveram origem em florestas nativas. Esse avanço da pecuária ocorre em função da crescente demanda pela produção de gado, uma vez que esse setor responde por cerca de 40% do Produto Interno Bruto (PIB) agrícola global (Whitton et al., 2021). Entretanto, o manejo inadequado das pastagens pode ocasionar a redução significativa dos teores de matéria orgânica e da fertilidade do solo, resultando em processos de degradação edáfica nos aspectos químicos, físicos e biológicos do solo e na diminuição da biodiversidade do bioma (Ekka et al., 2023).

Estudos revelam que a conversão da floresta em pastagem traz consequências drásticas para o microclima (Schinato et al., 2023), pois apresenta potencial para causar alterações nos ciclos do carbono e da água (Tanaka et al., 2021). Isso ocorre em função das diferenças fisiológicas existentes entre florestas e pastagens no que se refere à taxa de fotossíntese e à produção de folhas e raízes (Pereira-Flores et al., 2023), as quais modificam a capacidade de estoque de carbono e o aproveitamento da radiação solar para a fotossíntese (Peng et al., 2025), reduzindo drasticamente a evapotranspiração e a quantidade de água no solo no cenário de pastagem (Zalles et al., 2019; Barbino et al., 2021).

De acordo com a Figura 3, nos últimos três anos estudados (2020–2023), observou-se uma crescente no desmatamento em Santana do Araguaia, ao passo que a pastagem e a cultura da soja também apresentaram crescimento (Figura 4). Assim, pode-se inferir que as áreas de vegetação nativa suprimidas em Santana do Araguaia estão sendo convertidas, principalmente, em pastagens e lavouras de soja. Estudos evidenciam a expansão da agropecuária como o principal fator responsável pelo desmatamento nos biomas Amazônico e Cerrado (Zalles et al., 2019; Antelo; Michelotti; Contente, 2021; Popin et al., 2025).

Antelo, Michelotti e Contente (2021) destacam que o cultivo de soja tem se expandido de forma acentuada na região sul do Pará. As áreas destinadas a esse cultivo constituem uma classe de uso antrópico do solo de particular relevância em Santana do Araguaia, com registros de expansão a partir do ano 2000 (Wegner; Fernandes, 2024). Desde 2013, o município passou a apresentar um crescimento expressivo dessa cultura, sendo, atualmente, a classe de ocupação do solo que mais se expande. Essas mudanças no uso da terra refletem a crescente demanda internacional por alimentos (Molotoks; Smith; Dawson, 2021), o que tem resultado na conversão de ecossistemas nativos em áreas agrícolas (Van Dijk et al., 2021).

Na Amazônia Legal, as transformações mais intensas ocorreram no chamado "Arco do Desmatamento", uma zona de transição com o bioma Cerrado que abrange as fronteiras sul e leste da Amazônia, incluindo partes dos estados do Maranhão, Pará, Mato Grosso, Tocantins e Rondônia (Ferreira et al., 2025). Dessa forma, torna-se urgente a implementação de mecanismos eficazes de controle para conter o avanço do desmatamento, ao mesmo tempo em que se promove o aumento da produção e do bem-estar social (Hanh et al., 2024). Embora tenha ocorrido uma redução significativa em 2024 do desmatamento através de fiscalização e políticas públicas, ainda não é suficiente para garantir o uso sustentável dos recursos naturais no bioma amazônico e o desenvolvimento de uma agricultura mais sustentável (David; Macfarlane, 2025).

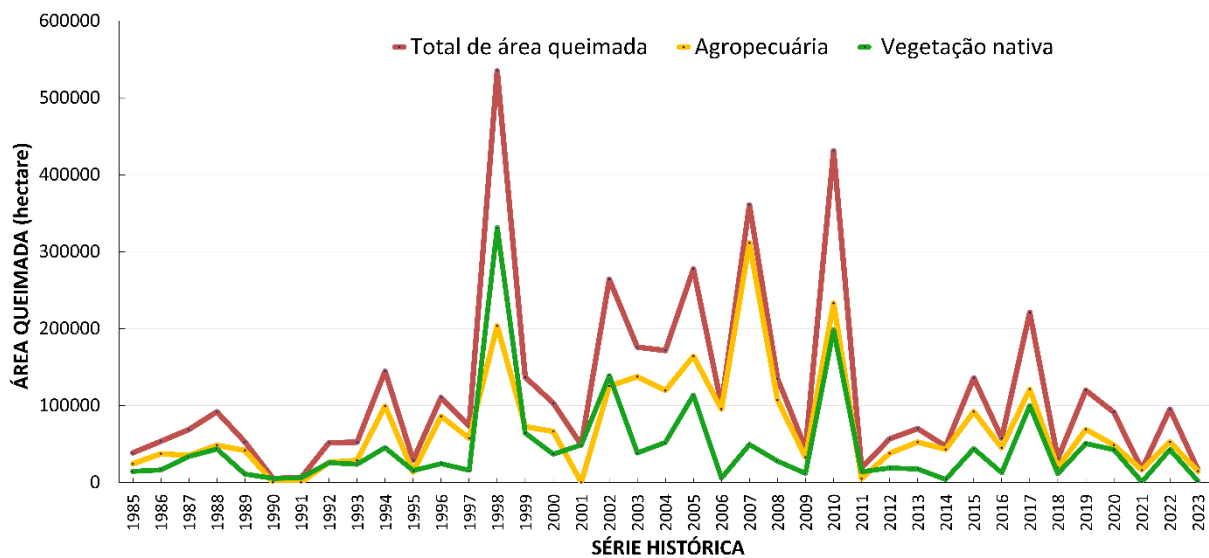
Nesse sentido, Stabile et al. (2020) propõem a eliminação da grilagem e criação de florestas públicas em áreas utilizadas para a especulação imobiliária, a fim de regularizar a posse da terra e limitar áreas disponíveis para a expansão descontrolada da agricultura e da pecuária. Os autores ainda destacam a

importância do cumprimento de mecanismos já existentes no Código Florestal brasileiro para controle do desmatamento em propriedades privadas, como programas de regularização, o Cadastro Ambiental Rural e o pagamento de serviços ambientais. Por fim, deve-se incentivar a adoção de tecnologias sustentáveis que promovam o aumento da produtividade em propriedades de médio e grande porte (Wang; Haq; Shahbaz, 2023), garantindo alcance das metas de produção sem a necessidade de expandir a lavoura e o pasto de produção para áreas de vegetação nativa (McClelland et al., 2025).

A expansão das áreas de pastagem e cultivo de soja tem contribuído de forma significativa para a supressão da vegetação nativa, favorecendo as queimadas observadas em Santana do Araguaia (Silva et al., 2024). Entretanto, o uso do fogo ainda é uma técnica tradicional muito utilizada na Amazônia para a eliminação de resíduos vegetais resultantes da biomassa proveniente da derrubada de árvores, para limpeza de pastagens e preparo do solo para o plantio (Reis; Leal, 2020). Nesse sentido, a Figura 5 apresenta o gráfico das cicatrizes do fogo em áreas de atividade agropecuária e áreas com vegetação nativa, onde é possível perceber que boa parte das cicatrizes do fogo no município estão em áreas de produção agropecuária, demonstrando a expressiva contribuição das atividades agrícolas e pecuárias para as queimadas.

Figura 5 – Cicatrizes de queimadas em áreas destinadas à produção agropecuária e em áreas de vegetação nativa no município de Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).

Figure 5 – Burn scars in areas designated for agricultural production and in areas of native vegetation in the municipality of Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).



Fonte: MapBiomias (2024)
Source: MapBiomias (2024).

O aumento das temperaturas e a redução da precipitação, decorrentes das mudanças climáticas, elevam o risco de incêndios de grande magnitude, com potencial para causar danos significativos à saúde da população, às infraestruturas e ao equilíbrio dos ecossistemas locais (Almeida; Guimarães, 2022; Silva Júnior; Pacheco, 2022). Outro agravante consiste no fato de que os incêndios florestais e em áreas agrícolas contribuem para o aumento da concentração de gases de efeito estufa, intensificando ainda mais o aquecimento global (Fearnside, 2018; Naval et al., 2025).

O fogo contribui para processos de volatilização, oxidação e erosão, promovendo a degradação da qualidade do solo, resultante da redução dos teores de carbono, nitrogênio, enxofre e outros nutrientes essenciais ao funcionamento do sistema (Naval et al., 2025). As queimadas também podem promover alterações significativas nas propriedades físicas do solo, ocasionando a degradação da estrutura, o aumento

da densidade aparente e a redução da porosidade total, interferindo no ciclo da água no solo, com diminuição da infiltração e aumento do escoamento superficial (Guimarães et al., 2017; Moazeni; Cerdà, 2024).

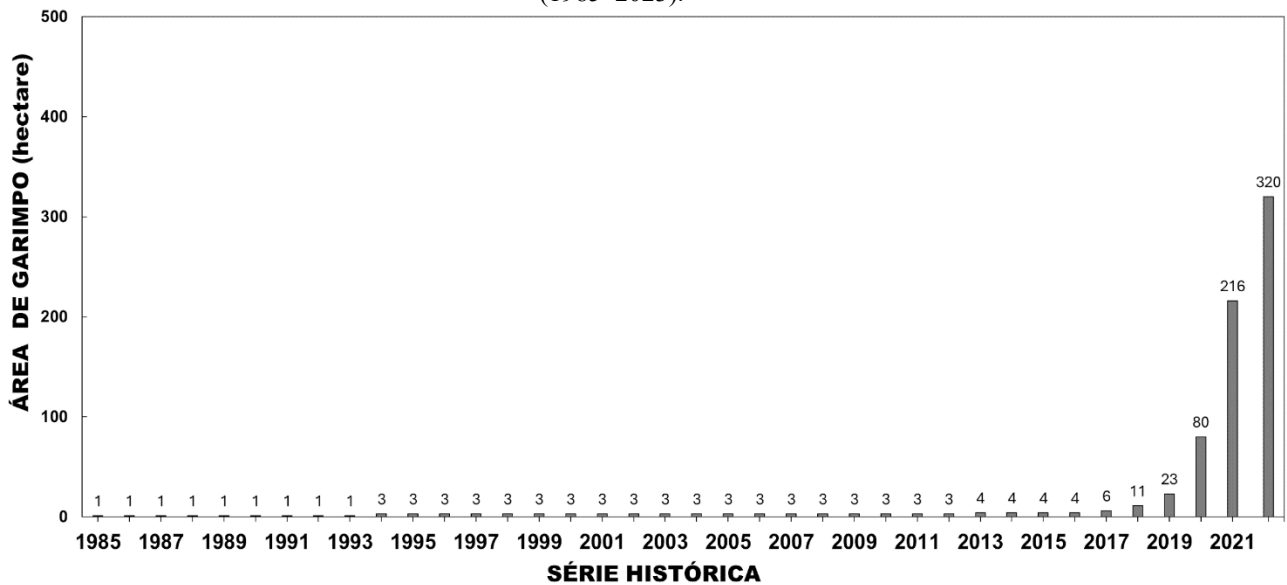
Diante dos impactos ambientais associados ao uso do fogo, diversas práticas agrícolas sustentáveis têm sido propostas como alternativas capazes de promover a conservação e a melhoria da qualidade do solo. Entre essas estratégias destacam-se o sistema de plantio direto, os sistemas agroflorestais, a integração lavoura-pecuária-floresta, a adubação verde, a rotação de culturas e a recuperação de pastagens degradadas (Khangura et al., 2023; Carvalho et al., 2024; Gianetti; Monteiro et al., 2024; Sadiq et al., 2025). De acordo com Ma et al. (2025), o sistema de plantio direto é amplamente aceito entre produtores de grãos, favorecendo a manutenção da cobertura do solo, a conservação da umidade e a melhoria das propriedades físicas e químicas do sistema, sendo, portanto, uma alternativa promissora para reduzir o uso do fogo e mitigar processos de degradação do solo em lavouras de soja no município de Santana do Araguaia.

3.3 Mineração

As áreas destinadas à mineração configuram-se como uma classe de uso antrópico que apresentou crescimento recente no município de Santana do Araguaia. Conforme ilustrado na Figura 6, entre 1985 e 2016 a atividade minerária manteve-se praticamente estável, ocupando áreas inferiores a 10 hectares. No entanto, a partir de 2017 observa-se um aumento progressivo, tornando-se mais expressivo após 2020, quando a expansão assume ritmo acelerado, alcançando 320 hectares em 2023.

Figura 6 – Evolução da área ocupada pela atividade minerária no município de Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).

Figure 6 – Evolution of the area occupied by mining activities in the municipality of Santana do Araguaia, Pará (1985–2023).



Fonte: MapBiomias (2024).

Source: MapBiomias (2024).

Embora a área ocupada pela mineração ainda representa proporção reduzida do território municipal quando comparada às classes associadas à agropecuária, sua expansão recente indica o surgimento de uma nova frente de pressão sobre os ecossistemas locais. Diferentemente da conversão para pastagens e lavouras, que se dá em grandes extensões contínuas, a atividade minerária tende a produzir impactos espacialmente concentrados, porém ambientalmente intensos.

Estudos realizados no estado do Pará indicam que as áreas ocupadas por garimpos superam aquelas destinadas à mineração industrial (Ferreira Neto et al., 2024), sendo estimado que aproximadamente 69,42% das áreas mineradas no estado estejam associadas a atividades ilegais (Oliveira et al., 2024). Nesse contexto, é plausível supor que parte da expansão observada no município esteja relacionada à dinâmica recente do garimpo na Amazônia, especialmente diante do crescimento superior a 90% da atividade de extração aurífera artesanal na região nos últimos anos (Fritz et al., 2024).

Do ponto de vista ambiental, a conversão da cobertura natural para áreas de mineração implica supressão da vegetação, remoção da camada superficial do solo e intensificação de processos erosivos, além do risco de contaminação de corpos hídricos superficiais e subterrâneos (Silva et al., 2026). A literatura demonstra que atividades minerárias, especialmente aquelas associadas à extração de ouro, podem resultar em aumento da concentração de metais pesados nos ecossistemas e bioacumulação em cadeias tróficas, comprometendo a integridade ecológica e os serviços ecossistêmicos locais. (Chakuya et al., 2023; Macklin et al., 2023).

Além dos impactos ambientais, a atividade garimpeira também gera consequências negativas em diferentes esferas, incluindo a esfera social. (Dube et al., 2024) Comunidades tradicionais, incluindo povos indígenas e quilombolas, podem sofrer coações, ameaças e deslocamentos forçados (Martins-Filho et al., 2023; Berg et al., 2025; Ali, 2023). Em alguns contextos, o garimpo ilegal tem sido associado à atuação de organizações criminosas, configurando o chamado narcogarimpo, caracterizado pela articulação entre exploração mineral ilícita, lavagem de dinheiro e domínio territorial (Hilend et al., 2023; Kabra & Gori, 2023). Esse cenário agrava a vulnerabilidade social e compromete a economia local, sobretudo quando envolve negociações fraudulentas e evasão fiscal causando prejuízos à estrutura sustentável de uma sociedade, afetando não somente o ambiente, mas a economia e o convívio social (Nagnonhou et al., 2023; Remeikienė; Gasparyniene, 2023).

Assim, embora a mineração ainda ocupe área significativamente inferior à destinada à agropecuária em Santana do Araguaia, a tendência de crescimento observada após 2017 indica um processo recente de intensificação que merece atenção. A consolidação dessa atividade pode potencializar processos de degradação ambiental localizados e ampliar riscos socioambientais, especialmente casos associados a práticas informais ou ilegais. Esse cenário reforça a necessidade de monitoramento contínuo e fortalecimento dos mecanismos de fiscalização e ordenamento territorial no município.

4. Conclusão

A análise temporal (1985–2023) das mudanças no uso e cobertura da terra no município de Santana do Araguaia evidenciou uma redução significativa da vegetação nativa ao longo do período analisado, com destaque para o ano de 2010, quando mais da metade da cobertura original já havia sido convertida em usos antrópicos. As transformações observadas estão diretamente associadas à expansão das atividades agropecuárias, especialmente à predominância das áreas de pastagem e ao crescimento expressivo do cultivo de soja a partir dos anos 2000. Em contraste, a expansão urbana apresentou baixa influência na dinâmica de transformação da paisagem.

Além disso, verificou-se o avanço recente da atividade minerária a partir de 2019, indicando um novo vetor potencial de impacto ambiental no município. A dinâmica do desmatamento também apresentou variações significativas ao longo do tempo, com pico em 2003, seguido de redução até 2020 e posterior retomada do crescimento nos anos subsequentes. Esses resultados evidenciam a consolidação da fronteira agropecuária como principal fator de transformação territorial no município, reforçando a necessidade de estratégias de planejamento e uso sustentável da terra, capazes de mitigar os impactos ambientais e promover o equilíbrio entre desenvolvimento econômico e conservação dos recursos naturais.

Dessa forma, a promoção de estratégias produtivas sustentáveis torna-se essencial para conciliar o desenvolvimento econômico do município com a conservação ambiental, sobretudo diante das pressões

associadas à supressão da vegetação nativa, à intensificação da agropecuária, às cicatrizes de fogo e às atividades de garimpo observadas na região.

5. Agradecimentos

6. Referências

Albert, J. S.; Carnaval, A. C.; Flantua, S. G.; Lohmann, L. G.; Ribas, C. C.; Riff, D.; et al., 2023, Human impacts outpace natural processes in the Amazon, *Science*, v. 379, n. 6630, p. eabo5003.

Ali, A. (2023). Conceptualizing displacement: The importance of coercion. *Journal of Ethnic and Migration Studies*, 49(5), 1083–1102.

Almeida, C. A.; et al., 2016, High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data, *Acta Amazonica*, v. 46, n. 3, p. 291–302.

Almeida, W. P.; Guimarães, C. L. S., 2022, Impactos das queimadas em época de estiagem sobre a qualidade do ar de Porto Velho (Rondônia) e seus possíveis efeitos na saúde, *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, v. 10, n. 1, p. 124–136.

Anand, AV, Sreedevi, MJ, Swapna, TS (2023). Conservação de plantas associada ao conhecimento tradicional: passado e futuro. In: Sukumaran, ST, TR, K. (eds) **Conservação e utilização sustentável de biorrecursos**. Desenvolvimento sustentável e biodiversidade, vol. 30. Springer, Singapura.

Antelo, F. S. F. S.; Michelotti, F.; Contente, S. P. C., 2021, Expansão da Soja e Controle da Terra no Sul do Pará, *Conexões* (Belém), v. 9, n. 2, p. 09–34.

Araujo, R., Assunção, J., & Bragança, A. (2025). Transportation infrastructure and deforestation in the Amazon. *Journal of Development Economics*, 177, 103559.

Barbino, G. C., Antonucci, B., Silva, D. J. V., & Andrade, N. L. R. (2021). Sensoriamento remoto aplicado ao índice de área foliar e fração da radiação fotossinteticamente ativa em áreas de floresta e pastagem na Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 9(2), 76–90.

Berenguer, E., Armenteras, D., Lees, A. C., Fearnside, P. M., Alencar, A., Almeida, C., et al. (2024). Drivers and ecological impacts of deforestation and forest degradation in the Amazon. *Acta Amazonica*, 54(spe1), e54es22342.

Berg, T., Nieto, E. A., Moura, S., et al. (2025). Socio-ecological conflict in Quilombola territory: Land titling and ecosystem health. *Sustainability Science*, 20, 903–918.

Bilbao, B. A., Ferrero, B. G., Falleiro, R. M., Moura, L. C., & Fagundes, G. M. (2025). Usos tradicionais do fogo por povos indígenas e comunidades locais na América do Sul. In A. Fidelis & V. R. Pivello (Orgs.), *Fogo nos ecossistemas sul-americanos* (Vol. 250). Estudos Ecológicos. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-89372-8>. Acesso em: 17/09/2025.

Bowman, K. W., Dale, S. A., Dhanani, S., Nehru, J., & Rabishaw, B. T. (2022). The degradation of the Amazon rainforest: Regional and global climate implications. In V. Ongoma & H. Tabari (Eds.), *Climate impacts on extreme weather: Current to future changes on a local to global scale* (pp. 217–234). Elsevier. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88456-3.00011-3>. Acesso em: 07/06/2025.

Cabral, B. F., Yanai, A. M., de Alencastro Graça, P. M. L., Escada, M. I. S., de Almeida, C. M., & Fearnside, P. M. (2024). Amazon deforestation: A dangerous future indicated by patterns and trajectories in a hotspot of forest destruction in Brazil. **Journal of Environmental Management**, 354, 120354.

Candido, M., Brandão, A., Munger, J., Rausch, L., & Gibbs, H. K. (2024). Protected areas in the Brazilian Amazon threatened by cycles of property registration, cattle ranching, and deforestation. **Land**, 13(7), 901.

Carvalho, P. C. F., et al. (2024). Integrated crop-livestock-forestry systems as a nature-based solution for sustainable agriculture. **Agroforestry Systems**, 98, 2309–2323.

Chakuya, J., Munkuli, N., Mutema, C., & Gandiwa, E. (2023). An assessment of the impact of illegal artisanal gold mining on the environment in parts of Chewore Safari Area, Northern Zimbabwe. **Environmental Research Communications**, 5(7), 075005.

Climate-Data.org. (2025). Climate data. Disponível em: <https://en.climate-data.org/search/?q=santana+do+araguaia>. Acesso em: 07/07/2025.

Corrêa, D. C. D. C., Pocard-Chapuis, R., Blanfort, V., Bochu, J. L., & Lescoat, P. (2025). Impacts of cattle farming practices and associated livestock systems on energy balances and greenhouse gas emissions in the municipality of Paragominas-State of Pará-Amazonia. **Pastoralism: Research, Policy and Practice**, 15, 14461.

Damania, R., et al. (2018). The road to growth: Measuring the tradeoffs between economic growth and ecological destruction. **World Development**, 101, 351–376.

Dar, S. A., Nabi, M., Dar, S. A., & Ahmad, W. S. (2022). Influence of anthropogenic activities on the diversity of forest ecosystems. In *Towards sustainable natural resources* (pp. 33–49).

David, H. C., & Macfarlane, D. W. (2025). Controls on deforestation in the Brazilian Amazon: Explaining past success actions, new challenges and recommendations. **Acta Amazonica**, 55, e55es24213.

Díaz-Vaquero, V., Negrões, N., Fonseca, C., Silveira, L., Jácomo, A. T., Quevedo, M., & Revilla, E. (2024). Conflict between cattle ranching and the conservation of jaguar (*Panthera onca*) and puma (*Puma concolor*) in the Amazon arc of deforestation. **Plos one**, 19(11), e0312077.

Donoso, V. G., Hirye, M. C. M., Gerwenat, C., & Reicher, C. (2024). Amazon deforestation and global meat consumption trends: An assessment of land use change and market data from Rondônia that shows why we should consider changing our diets. **Sustainability**, 16(11), 4526.

Dube, T., Dalu, T., Gxokwe, S., & Marambanyika, T. (2024). Assessment of land use and land cover, water nutrient and metal concentration related to illegal mining activities in an Austral semi-arid river system: A remote sensing and multivariate analysis approach. **Science of The Total Environment**, 907, 167919.

Ekka, P., Patra, S., Upreti, M., Kumar, G., Kumar, A., & Saikia, P. (2023). Land degradation and its impacts on biodiversity and ecosystem services. In A. Raj, M. K. Jhariya, A. Banerjee, S. Nema, & K. Bargali (Eds.), *Land and environmental management through forestry* (pp. 77–101). Wiley. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781119910527.ch4> . Acesso em: 11/12/2025.

Fearnside, P. M. (2018). Brazil's Amazonian forest carbon: The key to Southern Amazonia's significance for global climate. **Regional Environmental Change**, 18(1), 47–61.

Feldpausch, T. R., Carvalho, L., Macario, K. D., Ascough, P. L., Flores, C. F., Coronado, E. N. H., et al. (2022). Forest fire history in Amazonia inferred from intensive soil charcoal sampling and radiocarbon dating. **Frontiers in Forests and Global Change**, 5, 815438.

Feng, H., Han, X., & Zhu, Y., et al. (2024). Effects of long-term application of organic materials on soil water extractable organic matter, fulvic acid, humic acid structure and microbial driving mechanisms. **Plant and Soil**, 501, 323–341.

Feng, Q., Yang, H., Liu, Y., Liu, Z., Xia, S., Wu, Z., & Zhang, Y. (2024). Interdisciplinary perspectives on forest ecosystems and climate interplay: A review. **Environmental Reviews**, 33, 1–21.

Ferreira Neto, L. C., Diniz, C. G., Maretto, R. V., et al. (2024). Uncontrolled illegal mining and garimpo in the Brazilian Amazon. **Nature Communications**, 15, 9847.

Ferreira, A. T. D. S., Ribeiro, M. C. H., Oliveira, R. C. D., Ferreira, M. L., & Messias, C. G. (2025). Water surface loss and deforestation in the Brazilian Amazon biome by farming expansion and weak legislation. **Earth**, 6(3), 108.

Food and Agriculture Organization. (2015). *Status of the world's soil resources*. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/6ec24d75-19bd-4f1f-b1c5-5becf50d0871/content> . Acesso em: 09/07/2025.

Fritz, B., Peregovich, B., da Silva Tenório, L., et al. (2024). Mercury and CO₂ emissions from artisanal gold mining in Brazilian Amazon rainforest. **Nature Sustainability**, 7, 15–22.

Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisas - FADESPA. (2023). Estatísticas municipais paraenses: Santana do Araguaia. Diretoria de Estatística e de Tecnologia e Gestão da Informação. Disponível em: <https://www.fapespa.pa.gov.br/wp-content/uploads/2025/02/Santana-do-Araguaia.pdf>. Acesso em: 16/08/2025.

Gerson, J. R., Szponar, N., Zambrano, A. A., et al. (2022). Amazon forests capture high levels of atmospheric mercury pollution from artisanal gold mining. **Nature Communications**, 13, 559.

Gonçalves, V., & Ribeiro, E. (2021). Obtenção de série histórica da evolução da classe Floresta Plantada a partir dos dados de uso e cobertura do solo da Coleção 5 do projeto MapBiomass. **Metodologias e Aprendizado**, 4, 99–105.

Guimarães, R. M. L., et al. (2017). The merits of the Visual Evaluation of Soil Structure method (VESS) for assessing soil physical quality in the remote, undeveloped regions of the Amazon basin. **Soil and Tillage Research**, 173, 75–82.

Haddad, E. A., et al. (2024). Economic drivers of deforestation in the Brazilian Legal Amazon. *Nature Sustainability*, 7, 1141–1148.

Hanh, N. T., Chi, N. T. K., Hoang, L. N., Chi, N. P., Uyen, N. T. T., & Nhu, N. T. (2024). The moderating role of digitalisation on smart-green production willingness in agriculture. **International Journal of Sustainable Agricultural Management and Informatics**, 10(1), 27–47.

Hasan, S. S., Sarmin, N. S., & Miah, M. G. (2020). Assessment of scenario-based land use changes in the Chittagong Hill Tracts of Bangladesh. **Environmental Development**, 34, 100463.

Hilend, R., Bell, J. E., Griffis, S. E., & Macdonald, J. R. (2023). Illicit activity and scarce natural resources in the supply chain: A literature review, framework, and research agenda. **Journal of Business Logistics**, 44(2), 198–227.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2024). *Cidades e estados: Santana do Araguaia*. IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/santana-do-araguaia.html> . Acesso em: 16/08/2025.

Jaramillo, C. (2023). The evolution of extant South American tropical biomes. **New Phytologist**, 239(2), 477–493.

Justino, S. T. P., et al. (2025). Land use change and its climatic and vegetation impacts in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, 17(15), 7099.

Justino, S. T. P.; et al., 2025, Land Use Change and Its Climatic and Vegetation Impacts in the Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 17, n. 15, p. 7099–7099.

Kabir, M., Habiba, U., Iqbal, M. Z., Shafiq, M., Farooqi, Z. R., Shah, A., & Khan, W. (2023). Impacts of anthropogenic activities and climate change resulting from increasing concentration of carbon dioxide on environment in 21st century: A critical review. IOP Conference Series: **Earth and Environmental Science**, 1194(1), 012010.

Kabra, S., & Gori, S. (2023). Drug trafficking on cryptomarkets and the role of organized crime groups. **Journal of Economic Criminology**, 2, 100026.

Khan, S., & Dhadse, S. (2025). Carbon sequestration by terrestrial and marine biodiversity: A tool for combating climate change. **Sustainability and Biodiversity Conservation**, 4(2), 69–88.

Khangura, R., Ferris, D., Wagg, C., & Bowyer, J. (2023). Regenerative agriculture: A literature review on the practices and mechanisms used to improve soil health. **Sustainability**, 15(3), 2338.

Leal Filho, W., Dinis, M. A. P., Canova, M. A., et al. (2025). Managing ecosystem services in the Brazilian Amazon: The influence of deforestation and forest degradation in the world's largest rain forest. **Geoscience Letters**, 12, 1–15.

Lemes, R., Sampaio, G., Fisch, G., Alves, L. M., Maksic, J., Guatura, M., & Shimizu, M. (2023). Impacts of atmospheric CO₂ increase and Amazon deforestation on the regional climate: A water budget modelling study. *International Journal of Climatology*, 43(3), 1497–1513.

- Ma, Y., Li, Z., Xu, Y., Li, C., Ding, H., Li, C., Tang, Q., Liu, M., & Hou, J. (2025). The development of no-tillage seeding technology for conservation tillage—A review. *Sustainability*, 17(5), 1808.
- Macklin, M. G., Thomas, C. J., Mudbhatkal, A., Brewer, P. A., Hudson-Edwards, K. A., Lewin, J., et al. (2023). Impacts of metal mining on river systems: A global assessment. *Science*, 381(6664), 1345–1350.
- Mandal, S., & Banik, G. C. (2025). Forest degradation and its impact on soil carbon. In G. Shukla, A. K. Manohar, A. Raj Kizha, P. Panwar, & S. Chakravarty (Eds.), *Forest degradation and management* (pp. 207–225). Springer, Cham.
- Martins-Filho, P. R., Damascena, N. P., Araujo, A. P. D., Silva, M. C., Santiago, B. M., Deitos, A. R., & Machado, C. E. P. (2023). The devastating impact of illegal mining on indigenous health: A focus on malaria in the Brazilian Amazon. *Excli Journal*, 22, 400–402.
- Maza-Maza, J., et al. (2025). Impact of deforestation on ecosystem functions of Ecuador’s tropical dry forest under different protection status. *Trees, Forests and People*, 22, 101032.
- McClelland, S. C., Bossio, D., Gordon, D. R., et al. (2025). Managing for climate and production goals on croplands. *Nature Climate Change*, 15, 642–649.
- Mehmood, K., Anees, S. A., Shahzad, F., et al. (2025). Exploring vegetation health in Southern Thailand under climate stress from temperature and water impacts between 2000 and 2023. *Scientific Reports*, 15, 30491.
- Moazeni, S., & Cerdà, A. (2024). The impacts of forest fires on watershed hydrological response: A review. *Trees, Forests and People*, 18, 100707.
- Molotoks, A., Smith, P., & Dawson, T. P. (2021). Impacts of land use, population, and climate change on global food security. *Food and Energy Security*, 10(1), e261.
- Monteiro, A., Barreto-Mendes, L., Fanchone, A., Morgavi, D. P., Pedreira, B. C., Magalhães, C. A., et al. (2024). Crop-livestock-forestry systems as a strategy for mitigating greenhouse gas emissions and enhancing the sustainability of forage-based livestock systems in the Amazon biome. *Science of The Total Environment*, 906, 167396.
- Nagnonhou, S. R. B., Imoniana, J. O., Reginato, L., & Silva, W. L. (2023). Role of connectors in corporate fraud and corruption in era of circular economy. *Social Sciences*, 12(3), 134.
- Naval, M. L. M., et al. (2025). Impacts of repeated forest fires and agriculture on soil organic matter and health in southern Amazonia. *CATENA*, 254, 108924.
- Nayak, S., & Mandal, M. (2019). Impact of land use and land cover changes on temperature trends over India. *Land Use Policy*, 89, 104238.
- Nguyen, T. T., Grote, U., Neubacher, F., Do, M. H., & Paudel, G. P. (2023). Security risks from climate change and environmental degradation: Implications for sustainable land use transformation in the Global South. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 63, 101322.
- Nunes, L. J. (2023). The rising threat of atmospheric CO₂: A review on the causes, impacts, and mitigation strategies. *Environments*, 10(4), 66.

- Nzabarinda, V., Bao, A., Tie, L., Uwamahoro, S., Kayiranga, A., Ochege, F. U., et al. (2025). Expanding forest carbon sinks to mitigate climate change in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 207, 114849.
- Oliveira, C. E. S., et al. (2023). Impact of extreme wildfires from the Brazilian forests and sugarcane burning on the air quality of the biggest megacity in South America. **Science of The Total Environment**, 888, 163439.
- Oliveira, S. M., Beltrão, N. E. S., Machado, F. F., & Lima, I. F. (2024). Monitoring vegetation cover in mining areas in the municipality of Ipixuna do Pará (PA). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 48(3-2024), 115–120.
- Panchal, P., Preece, C., Peñuelas, J., & Giri, J. (2022). Soil carbon sequestration by root exudates. **Trends in Plant Science**, 27(8), 749–757.
- Panja, P. (2021). Deforestation, carbon dioxide increase in the atmosphere and global warming: A modelling study. **International Journal of Modelling and Simulation**, 41(3), 209–219.
- Peng, D., Zhang, B., Zheng, S., et al. (2025). Newly established forests dominated global carbon sequestration change induced by land cover conversions. **Nature Communications**, 16, 6570.
- Pereira-Flores, M. E., Justino, F., Rodrigues, J. M., et al. (2023). Seasonal climate impact on Brazilian pasture (*Brachiaria brizantha* cv Marandu): Growth rate, CO₂ efflux, and irrigation strategies. **Theoretical and Applied Climatology**, 151, 651–666.
- Piccolo, A., & Drosos, M. (2025). The essential role of humified organic matter in preserving soil health. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, 12, 21.
- Popin, G. V., Resende, M. E. B., Locatelli, J. L., Santos, R. S., Siqueira-Neto, M., Brando, P. M., Neill, C., & Cerri, C. E. P. (2025). Land-use change and deep-soil carbon distribution on the Brazilian Amazon-Cerrado agricultural frontier. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 381, 109451.
- Psistaki, K., Tsantopoulos, G., & Paschalidou, A. K. (2024). An overview of the role of forests in climate change mitigation. **Sustainability**, 16(14), 6089.
- Reis, R. G., & Leal, M. L. M. (2020). Análise das relações de focos de calor e desflorestamento no município de Lábrea, sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 8(3), 38–53.
- Remeikienė, R., & Gasparenienė, L. (2023). Effects of economic and financial crime on the government budget and the quality of public services. In M. V. Achim (Ed.), *Economic and financial crime, sustainability and good governance* (pp. 85–102). Springer, Cham. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-34082-6> . Acessado em: 20/12/25.
- Sadeck, C. C., Ferreira Filho, H. R., & Beltrão, N. E. (2025). Aspectos ambientais da expansão da soja no município de Santana do Araguaia, sudeste do Pará, Amazônia Oriental. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, 19(7), 1–18.

Sauer, S. (2018). Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: The agribusiness economy and its social and environmental conflicts. **Land Use Policy**, 79, 326–338.

Schinato, F., Munka, M. C., Olmos, V. M., & Bussoni, A. T. (2023). Microclimate, forage production and carbon storage in a eucalypt-based silvopastoral system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, 344, 108290.

Shabani, S., Jaafari, A., Vahedi, A. A., Alidoost, M., Sobhzhahedi, S., Ahmadi, A., et al. (2025). Spatially explicit machine learning reveals province-specific drivers of deforestation in the Hyrcanian forests. **Ecological Informatics**, 92, 103533.

Silva Júnior, J. A. S., & Pacheco, A. P. (2022). Avaliação de índices espectrais e classificação normal Bayes usando imagens OLI e TIRS para o mapeamento de áreas queimadas no Cerrado. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 10(3), 132–147.

Silva, K. F. A., et al. (2026). Potential mining impacts on ecosystem services and biodiversity on Brazil's quartz and iron mountains. **Science of The Total Environment**, 1016, 181479.

Smith, C., De Freitas, K., & Mistry, J. (2024). How global narratives shape local management: A history of fire in the tropical savannas of Belize and Guyana. *The Geographical Journal*, 190(1), e12539. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/geoj.12539>. Acesso em: 16/01/2026.

Souza, C. M., et al. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with Landsat archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, 12(17), 2735.

Souza, C., Tenneson, K., Dilger, J., Wespestad, C., & Bullock, E. (2024). Forest degradation and deforestation. In J. A. Cardille, M. A. Crowley, D. Saah, & N. E. Clinton (Eds.), *Cloud-based remote sensing with Google Earth Engine* (pp. xx–xx). Springer, Cham. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_49. Acesso em: 07/07/2025.

Stabile, M. C. C., et al. (2020). Solving Brazil's land use puzzle: Increasing production and slowing Amazon deforestation. **Land Use Policy**, 91, 104362.

Tanaka, Y., Minggat, E., & Roseli, W. (2021). The impact of tropical land-use change on downstream riverine and estuarine water properties and biogeochemical cycles: A review. **Ecological Processes**, 10, 40.

Van Dijk, M., et al. (2021). A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010–2050. **Nature Food**, 2(7), 494–501.

Vilela, H. T. F., Gonçalves, A. F. A., França, L. C. J., & Acerbi Júnior, F. W. (2021). Conflitos de uso do solo em áreas de preservação permanente em uma região do Alto Rio Grande (Minas Gerais). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 9(1), 65–81.

Wang, C. H., & Juo, W. J. (2021). An environmental policy of green intellectual capital: Green innovation strategy for performance sustainability. *Business Strategy and the Environment*, 30(7), 3241–3254.

Wang, J., Li, W., Haq, S. U., & Shahbaz, P. (2023). Adoption of renewable energy technology on farms for sustainable and efficient production: Exploring the role of entrepreneurial orientation, farmer perception, and government policies. **Sustainability**, 15(7), 5611.

Wegner, R. C., & Fernandes, M. P. (2024). Expansion of investments by Chinese companies in the Brazilian Amazon—the case of agribusiness. **Contexto Internacional**, 45, e20220010.

Whitton, C., Bogueva, D., Marinova, D., & Phillips, C. J. C. (2021). Are we approaching peak meat consumption? Analysis of meat consumption from 2000 to 2019 in 35 countries and its relationship to gross domestic product. **Animals**, 11(12), 3466.

Yurak, V. V., & Fedorov, S. A. (2025). Review of natural and anthropogenic emissions of carbon dioxide into the earth's atmosphere. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 22, 2719–2736.

Zalles, V., et al. (2019). Near doubling of Brazil's intensive row crop area since 2000. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, 116(2), 428–435.