Mercator, Fortaleza, v. 25, e25015, 2026 ISSN:1984-2201

DINÂMICAS FUTURAS DE USO E COBERTURA DA TERRA NO BIOMA CERRADO

https://doi.org/10.36517/rm2026.e25015

Frazão, A.P.R.F. [a*] - Ferreira, M.E. [b] - Santos, S.V. [c] - Sousa, S.B. [d]

(a) Doutora em Geografia
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-0855-2200. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/2451237304715628.
(b) Doutor em Ciências Ambientais
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4516-6373. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/4498594723433539.
(c) Mestrando em Geografia
ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7046-4395. **LATTES:** https://lattes.cnpq.br/9243109923442167.
(d) Doutora em Geografia
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9776-3295. **LATTES:** http://lattes.cnpq.br/5542860613403348.

Article history:
Received 19 February, 2026
Accepted 14 May, 2026
Published 10 July, 2026

(*) CORRESPONDING AUTHOR
Address: UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500, CEP: 91501-970, Porto Alegre (RS), Brasil. Tel: (+55 62) 98239-9877.
E-mail: anapaulafrazao123@gmail.com

Resumo

O Cerrado, reconhecido como hotspot global de biodiversidade, enfrenta intensa pressão decorrente da expansão agropecuária. Com o objetivo de subsidiar políticas públicas, este estudo projetou cenários futuros de uso e cobertura da terra até 2100 por meio de modelagem espacial em Python, baseada em Cadeias de Markov, Pesos de Evidência e métricas de vizinhança. As taxas de desmatamento do PRODES foram utilizadas para definir três cenários: otimista (6.512,6 km²/ano), tendencial (8.140,8 km²/ano) e pessimista (11.551 km²/ano). Os resultados indicam que o cenário otimista reduz o ritmo de perda da vegetação nativa, enquanto o tendencial mantém padrões recentes de conversão e o pessimista intensifica a fragmentação da paisagem. As maiores perdas anuais concentram-se entre 2030 e 2050 (otimista: –2.707 km²; tendencial: –6.342 km²; pessimista: –15.711 km²), com posterior desaceleração em razão da redução de áreas remanescentes. Em 2100, a vegetação nativa poderá ser reduzida para 1,3 a 1,7 milhão de km², correspondendo a 47–61% da cobertura original. Conclui-se que a continuidade das trajetórias atuais compromete a resiliência ecológica do bioma, reforçando a necessidade de políticas rigorosas de conservação e controle do desmatamento.

Palavras-chave: Modelagem Espacial; Uso e Cobertura da Terra; Cerrado; Cenários de Desmatamento; Geotecnologias.

Abstract / Resumen

FUTURE DYNAMICS OF LAND USE AND LAND COVER IN THE CERRADO BIOME

The Cerrado, recognized as a global biodiversity hotspot, is under intense pressure from agricultural expansion. To support public policy planning, this study projected future land use and land cover scenarios up to 2100 using a spatial modeling framework developed in Python, based on Markov Chains, Weights of Evidence, and neighborhood metrics. PRODES deforestation rates were used to define three scenarios: optimistic (6,512.6 km²/year), trend (8,140.8 km²/year), and pessimistic (11,551 km²/year). The results indicate that the optimistic scenario slows the loss of native vegetation, whereas the trend scenario maintains recent conversion patterns and the pessimistic scenario intensifies landscape fragmentation. The highest annual losses are concentrated between 2030 and 2050 (optimistic: –2,707 km²; trend: –6,342 km²; pessimistic: –15,711 km²), followed by a decline due to the scarcity of remaining natural areas. By 2100, native vegetation may be reduced to 1.3–1.7 million km², corresponding to 47–61% of its original extent. These findings indicate that maintaining current trajectories may compromise the biome's ecological resilience, highlighting the need for stricter conservation and deforestation control policies.

Keywords: Land-Use Change; Spatial Modeling; Cerrado Biome; Deforestation Scenarios; Environmental Policy.

DINÁMICAS FUTURAS DE USO Y COBERTURA DE LA TIERRA EN EL BIOMA CERRADO

El Cerrado, reconocido como un hotspot global de biodiversidad, enfrenta una intensa presión derivada de la expansión agropecuaria. Con el objetivo de subsidiar políticas públicas, este estudio proyectó escenarios futuros de uso y cobertura de la tierra hasta 2100 mediante un modelo espacial desarrollado en Python, basado en Cadenas de Markov, Pesos de Evidencia y métricas de vecindad. Las tasas de deforestación del PRODES se utilizaron para definir tres escenarios: optimista (6.512,6 km²/año), tendencial (8.140,8 km²/año) y pesimista (11.551 km²/año). Los resultados indican que el escenario optimista reduce el ritmo de pérdida de vegetación nativa, mientras que el tendencial mantiene los patrones recientes de conversión y el pesimista intensifica la fragmentación del paisaje. Las mayores pérdidas anuales se concentran entre 2030 y 2050 (optimista: –2.707 km²; tendencial: –6.342 km²; pesimista: –15.711 km²), seguidas de una desaceleración debido a la escasez de áreas remanentes. Para 2100, la vegetación nativa podría reducirse a entre 1,3 y 1,7 millones de km², equivalentes al 47–61% de su cobertura original. Se concluye que la continuidad de las trayectorias actuales compromete la resiliencia ecológica del bioma, lo que refuerza la necesidad de políticas estrictas de conservación y control de la deforestación.

Palabras-clave: Modelación Espacial; Uso y Cobertura de la Tierra; Cerrado; Escenarios de Deforestación; Geotecnologías.

This is an open access article under the CC-BY 3.0 Creative Commons license

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de grãos e carne do mundo (FAO, 2010), e o Cerrado se consolidou como uma das principais regiões agrícolas globais (Oliveira et al., 2019). Esse processo foi impulsionado por condições topográficas favoráveis, com relevo predominantemente plano ou suavemente ondulado, pela aptidão dos solos à mecanização e pelos baixos custos da terra (Lapola et al., 2014; Klink; Machado, 2005).

Com aproximadamente 2 milhões de km², o Cerrado é o segundo maior bioma do Brasil em extensão territorial, ficando atrás apenas da Amazônia. Sua localização estratégica, no centro do país, o conecta principalmente a dois biomas: a Caatinga, ao nordeste, e a Amazônia, ao norte e noroeste.

O bioma é considerado o hotspot mais ameaçado entre as savanas tropicais do mundo (Silva et al., 2002). Atualmente, apenas 43% da sua área é de vegetação nativa, enquanto cerca de 47% já foi convertida para uso agropecuário (Mapbiomas, 2024). Historicamente, a taxa de desmatamento no Cerrado tem superado a registrada na Amazônia brasileira, sendo a expansão agrícola, sobretudo nas últimas três décadas, o principal motor dessas transformações na paisagem (Colman et al., 2024).

A conversão do Cerrado em uma das maiores fronteiras agropecuárias do mundo está diretamente associada à expansão da soja e da pecuária extensiva, especialmente a partir dos anos 2000. A região concentra cerca de 60% da produção de soja do país, sendo o principal destino de investimentos do agronegócio brasileiro nas últimas décadas (Gibbs et al., 2015). Ademais, pesquisas recentes destacam que grande parte do desmatamento ocorre em conformidade com a legislação atual, evidenciando um modelo de uso do solo que combina legalidade formal com impactos socioambientais significativos (Soterroni et al., 2019).

A legislação ambiental em relação ao bioma Cerrado é menos restritiva ao se comparar com outros biomas do Brasil, a prova disso é o fato dele ser o bioma com a menor proporção de áreas legalmente protegidas no Brasil. Apenas cerca de 8,3% de sua extensão está inserida em Unidades de Conservação ou Terras Indígenas (Brasil, 2023), número inferior às metas de conservação internacional e muito distante dos 47% do território que já foi convertido para atividades produtivas (Mapbiomas, 2024). Além disso, o bioma não é contemplado pela Moratória da Soja, instrumento que ajudou a reduzir o desmatamento na Amazônia (Gibbs et al., 2016), o que favorece o avanço contínuo da produção agrícola mesmo em áreas recém-desmatadas. Essa lacuna institucional reforça a vulnerabilidade do Cerrado frente às pressões do mercado global e à ausência de políticas públicas específicas e eficazes de conservação.

Considerando esse contexto de intensas pressões antrópicas e baixa representatividade em áreas legalmente protegidas, torna-se urgente compreender as dinâmicas territoriais futuras no Cerrado. Este estudo busca simular cenários de uso e cobertura da terra até 2100 para o cerrado, por meio de modelagem espacial preditiva, com foco especial sobre as Terras Indígenas e Unidades de Conservação. A análise permite identificar áreas mais suscetíveis à conversão antrópica e contribui para o planejamento territorial orientado à conservação.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo (Figura 1) engloba todo o bioma Cerrado, incluindo áreas em diferentes estados do país: Goiás (GO), Tocantins (TO), Bahia (BA), Maranhão (MA), Piauí (PI), Mato Grosso (MT), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), São Paulo (SP) e o Distrito Federal (Brasília).

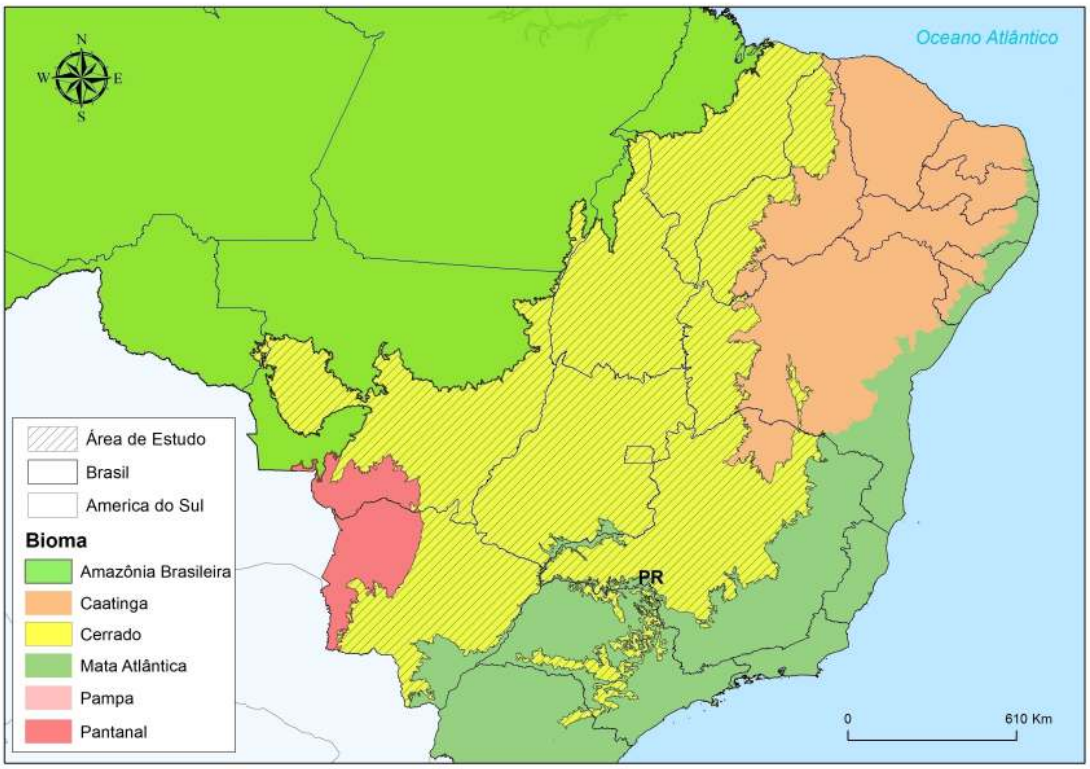

Figura 1 – Mapa de localização do bioma Cerrado. Fonte: autores (2025).

O Cerrado possui clima tropical sazonal, com duas estações bem definidas (uma seca e outra chuvosa) e apresenta vegetação predominantemente savânica, composta por formações de campo aberto, arbustos e árvores tortuosas. Os solos predominantes são geralmente ácidos e de baixa fertilidade natural. O bioma é reconhecido como um hotspot mundial de biodiversidade, devido à elevada riqueza de espécies endêmicas e ao alto grau de ameaça, com mais de 50% de sua vegetação original já convertida para usos antrópicos (Sano et al., 2019).

Além da expressiva conversão de áreas naturais, o Cerrado abriga parte das principais bacias hidrográficas do Brasil, como as bacias do Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná e Parnaíba, o que lhe confere papel central na regulação hídrica nacional. Sua densa rede de drenagem, associada à alta variabilidade climática e à expansão das atividades agropecuárias, torna o bioma particularmente sensível às mudanças no uso e cobertura da terra, aspecto essencial para a compreensão e a modelagem dos cenários ambientais aqui propostos.

FLUXOGRAMA METODOLÓGICO

A metodologia empregada neste estudo pode ser compreendida em quatro etapas principais: aquisição dos dados, reclassificação e geração de variáveis espaciais, modelagem preditiva e, por fim, validação dos resultados. A Figura 2 apresenta um fluxograma esquemático com o detalhamento de cada uma dessas etapas, permitindo uma visão geral do processo metodológico adotado, a fim de compreender melhor cada etapa adotada.

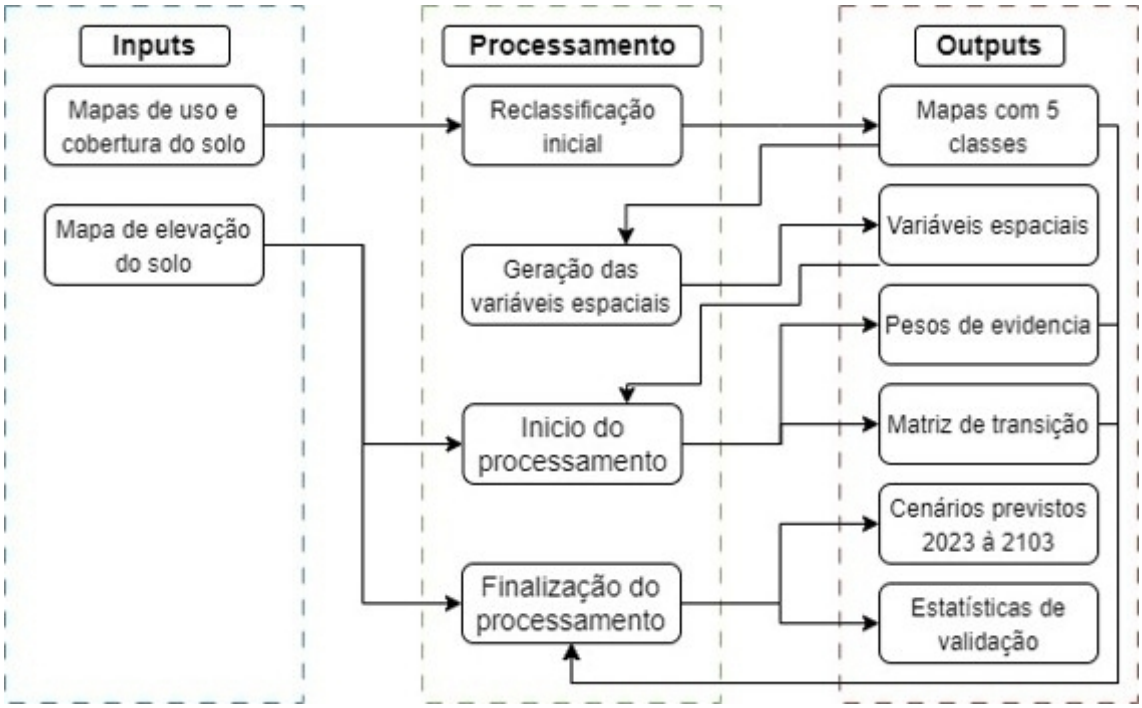

Figura 2 – Fluxograma metodológico. Fonte: autores (2025).

BASE DE DADOS

De acordo com Miziara e Ferreira (2008), as transformações no uso e na cobertura da terra no bioma Cerrado estão fortemente relacionadas a atributos do solo, como a topografia, a fertilidade natural e a localização geográfica, especialmente em relação à proximidade de centros consumidores ou produtores. Assim, determinadas áreas tornam-se mais ou menos propensas a serem incorporadas às atividades produtivas, a depender do grau de compatibilidade com essas variáveis, tanto naturais quanto antrópicas. Com base nesse estudo, foram selecionadas algumas bases de dados a fim de colaborar no modelo empregado.

Dessa forma, as bases de dados utilizadas neste estudo estão listadas a seguir acompanhadas dos procedimentos analíticos correspondentes.

1.Mapa de uso da terra (estado inicial da paisagem do bioma, sendo o T1 e T2 e T3). Optou-se pelo mapa de uso e cobertura da coleção 9 do MapBiomas, que se constitui como o maior acervo de dados de uso dos biomas brasileiros, possuindo dados de 1986 a 2023. A Coleção 9 oferece um mapeamento para o Cerrado, com acurácia global de 90% no Nível 1 e 85 % no Nível 2 (MapBiomas, 2024). Estes dados, possuem uma resolução espacial de 30 metros, e são gerados a partir da análise de séries temporais de imagens Landsat, utilizando classificadores automáticos baseados em aprendizado de máquina e validação com amostras de campo. A classificação temática é organizada em seis grandes classes de uso e cobertura da terra e cada uma delas é desdobrada em subclasses, permitindo a identificação mais precisa dos elementos presentes em cada pixel, como pastagem, floresta, área urbana consolidada, entre outros. Dessa forma, foi utilizado os dados para a área do bioma Cerrado, para os anos de 2003, 2013 e 2023.

2.Declividade. Foi derivada a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) gerado com base nas imagens de altimetria da missão SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Para o cálculo, aplicou-se uma estatística de vizinhança, utilizando o desvio padrão em uma matriz 3x3, o que permitiu capturar não apenas a inclinação do terreno, mas também a variação dessa inclinação entre os pixels adjacentes. Esse procedimento possibilitou identificar e destacar as áreas com menor desvio padrão da altitude, representando regiões mais planas, e aquelas com maior variação altimétrica, indicando terrenos com maior declividade.

3.Mapa de estradas. Foi obtido a partir da base de dados do OpenStreetMap (OSM), uma plataforma colaborativa que reúne informações geoespaciais atualizadas por usuários em todo o mundo. Foram extraídas as feições lineares correspondentes a rodovias pavimentadas, não pavimentadas e em construção, recortadas conforme o limite do bioma Cerrado. Essa base se destaca pela ampla cobertura, constante atualização e riqueza de atributos, permitindo análises detalhadas da infraestrutura de transporte na região.

4.Mapa de Hidrografia. Disponibilizado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), este mapa representa os cursos d'água do país, conforme a base hidrográfica oficial do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), em escala de 1:1.000.000. As feições hidrográficas foram recortadas segundo o limite do bioma Cerrado, abrangendo rios principais, afluentes e demais trechos da rede de drenagem.

RECLASSIFICAÇÃO

Com o objetivo de simplificar a modelagem, as classes originais do MapBiomas foram reclassificadas em cinco categorias principais: vegetação natural, agricultura, pastagem, área urbana e corpos d'água. Essa reclassificação permite um melhor entendimento das transições de uso e cobertura da terra, reduzindo a complexidade do modelo e diminuindo o esforço computacional sem comprometer a representatividade dos processos espaciais observados (Alamanos, 2023).

Para a reclassificação dos dados de uso e cobertura da terra, obtidos através da plataforma MapBiomas, utilizou-se a ferramenta Reclassify do ArcGIS Pro. Essa ferramenta permite alterar os valores de cada pixel em um raster de acordo com um padrão pré-estipulado, facilitando as futuras análises e interpretação dos dados. Dessa forma, a reclassificação foi realizada convertendo todas as classes originais do MapBiomas e os novos valores atribuídos.

VARIÁVEIS ESPACIAIS

Com o objetivo de aprimorar a capacidade explicativa do modelo preditivo e aumentar sua relevância analítica, foram incorporadas variáveis espaciais que representam a distância em relação às principais classes de uso antrópico: agricultura, pastagem, áreas urbanas, estradas e hidrografia. A inclusão dessas variáveis permite ao modelo capturar relações espaciais mais complexas no território, reconhecendo fatores externos que influenciam as transições entre as classes de uso e cobertura da terra.

Tomando como base o mapa de uso e cobertura da terra referente ao ano de 2022 e os mapas de declividade, estradas, hidrografia, foi utilizada a ferramenta Euclidean Distance do software ArcGIS para gerar rasters contínuos de distância para cada uma das classes selecionadas. Esses rasters foram posteriormente reclassificados em uma escala de 1 a 10, na qual valores mais altos representam maior proximidade às feições antrópicas, enquanto os valores mais baixos indicam maior distância.

A reclassificação em uma escala comum facilita a padronização das variáveis, promovendo a integração eficiente ao modelo e permitindo maior escalabilidade. Essa abordagem elimina a necessidade de ajustes individuais entre diferentes tipos de variáveis, além de contribuir para a correta atribuição de pesos pelo modelo, conforme os princípios da inferência bayesiana.

MODELAGEM DAS MUDANÇAS E SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS FUTUROS

A simulação dos cenários futuros de uso e cobertura da terra foi realizada por meio de um modelo híbrido, que integra Pesos de Evidência (WoE), fundamentado no Teorema de Bayes, com Autômatos Celulares acoplados a Cadeias de Markov (CA-Markov). Essa abordagem permite representar tanto a dimensão estatística quanto a estrutura espacial das transições entre classes de uso e cobertura da terra, sendo amplamente empregada em estudos de mudanças ambientais com foco em dinâmicas antrópicas (Marko et al., 2016; Pedrosa; Câmara, 2002).

CÁLCULO DOS PESOS DE EVIDÊNCIA (WOE)

A etapa inicial do processo consiste na aplicação do modelo de Pesos de Evidência, conforme proposto por Bonham-Carter (1994), com base na seguinte formulação bayesiana (Eq. 01):

$$W^{+} = \ln\left(\frac{P(B|A)}{P(B|\neg A)}\right) \quad \text{e} \quad W^{-} = \ln\left(\frac{P(\neg B|A)}{P(\neg B|\neg A)}\right) \qquad \text{Eq. 01}$$

Onde:

• W+ representa o peso de evidência favorável à ocorrência da transição;

• W− representa o peso contrário à ocorrência da transição;

• P(B|A) é a probabilidade condicional da transição B ocorrer na presença da variável A;

• P(B|¬A) é a probabilidade de a transição ocorrer na ausência da variável;

• ln é o logaritmo natural.

Esses pesos foram calculados a partir de mapas reclassificados das variáveis explicativas (ex: declividade, distâncias às classes antrópicas) em valores de 1 a 10. A reclassificação padroniza a influência das variáveis, promovendo a comparabilidade entre elas.

GERAÇÃO DA MATRIZ DE TRANSIÇÃO

Com base em dois mapas de uso e cobertura da terra espaçados em 10 anos, é construída uma matriz de transição de Markov, que estima a probabilidade de mudança entre as classes no intervalo considerado. A fórmula geral é (Eq. 02):

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_j n_{ij}} \qquad \text{Eq. 02}$$

Onde:

• Pij é a probabilidade de transição da classe i para a classe j;

• nij é o número de pixels que mudaram de i para j;

• A soma é realizada sobre todas as classes j.

Essa matriz representa o componente temporal do modelo e serve como base para a simulação futura.

SIMULAÇÃO COM AUTÔMATOS CELULARES DE MARKOV (CA-MARKOV)

A simulação espacial é realizada por meio da integração da matriz de transição com Autômatos Celulares, que consideram o estado dos pixels vizinhos para definir a transição de cada célula. A influência espacial é avaliada a partir de uma janela de vizinhança 7×7, segundo a lógica (Eq. 03):

$$P_{ij}(x,y) = P_{ij} \cdot f(N_{xy}) \qquad \text{Eq. 03}$$

Onde:

• Pij(x,y) é a probabilidade ajustada de transição para o pixel (x,y);

• f(Nxy) é uma função de influência dos vizinhos (número ou predominância de determinada classe na vizinhança).

O Cellular Automata Markov (CAM), é um dos modelos mais confiáveis e utilizados por pesquisadores para uma análise espacial e temporal das mudanças de uso e cobertura da terra (Marko et al., 2016). Segundo Pedrosa e Câmara (2002), as cadeias de Markov são modelos matemáticos para

descrever processos estocásticos. Integrando a matriz de transição com a abordagem de Autômatos Celulares, o modelo incorpora a influência espacial dos vizinhos em cada célula. Essa integração aumenta o realismo espacial das simulações, capturando padrões de mudança que dependem da configuração espacial das classes.

PREVISÕES ATÉ 2100

O modelo resultante (Figura 3) foi aplicado para gerar previsões decenais do uso e cobertura da terra até o ano de 2100, totalizando oito mapas preditivos (de 2030 a 2100), junto com um de validação (2023). Essa projeção permite visualizar possíveis cenários futuros e subsidiar o planejamento territorial.

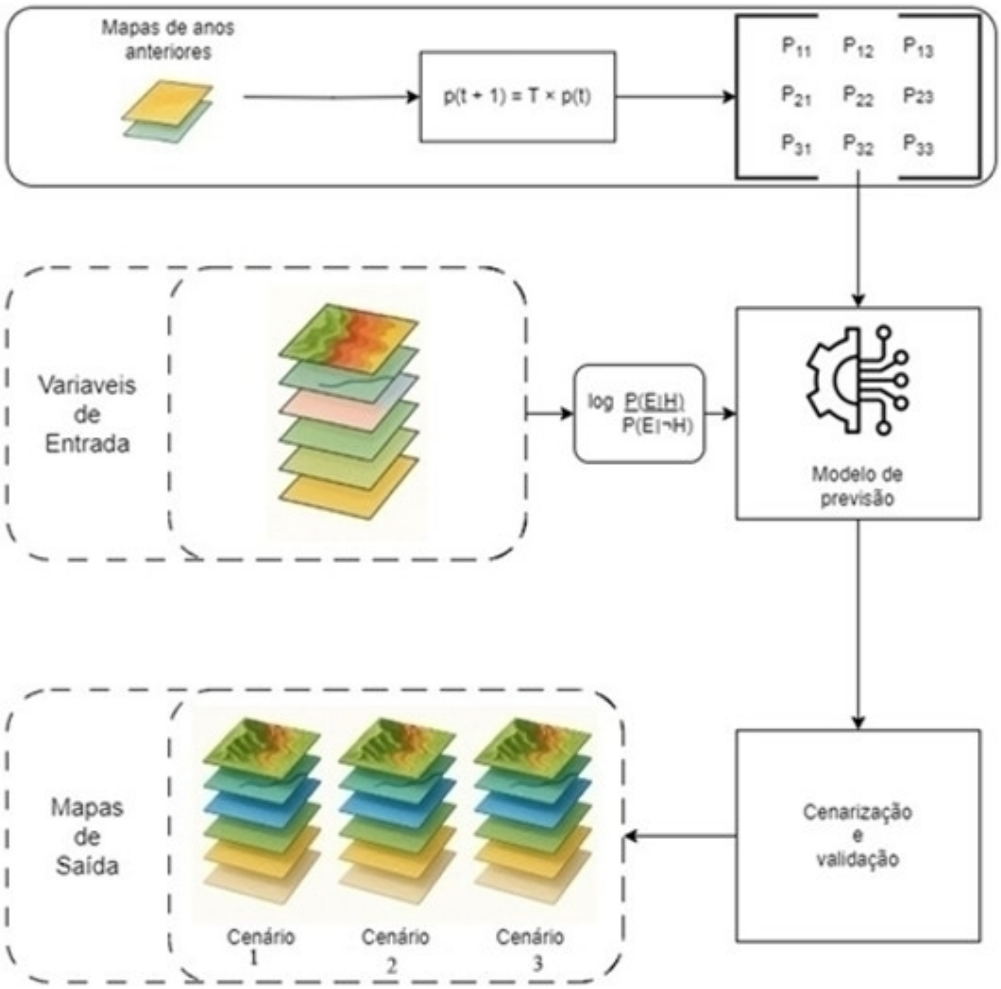

Figura 3 – Processos da simulação dos cenários. Fonte: autores (2025).

O fluxo do processo inicia com a leitura do mapa de uso e cobertura da terra do ano mais recente disponível, juntamente com as variáveis explicativas necessárias para o cálculo dos pesos de evidência, que são armazenados em uma variável global para uso posterior. Em seguida, inicia-se um loop que percorre pares de mapas em intervalos de 10 anos (por exemplo, 2000 e 2010, depois 2010 e 2020, e assim por diante). Para cada par, calcula-se a matriz de transição e, em seguida, cada pixel é analisado individualmente, considerando sua categoria atual e os valores dos pixels em uma janela de 7×7 ao redor.

Nesse ponto, aplica-se o Índice de Pressão de Desmatamento (IPD), responsável por ajustar as probabilidades de transição com base na influência exercida pela vizinhança e no contexto de pressão antrópica definido para cada cenário. O IPD foi padronizado em uma escala de 0 a 10, em que valores próximos de 0 indicam ausência ou baixa pressão e valores próximos de 10 representam pressão muito alta.

A calibração do IPD foi realizada a partir da série histórica de desmatamento do Cerrado (PRODES/INPE). Inicialmente, foram definidas três taxas de referência: (i) taxa tendencial, obtida pela média recente (2018–2022), representando o padrão atual; (ii) taxa otimista, equivalente a 80% da taxa tendencial, simulando maior controle e efetividade de políticas ambientais; e (iii) taxa pessimista, baseada na média dos anos de pico de desmatamento (2013, 2014, 2015 e 2022), refletindo forte expansão da fronteira agropecuária. Essas taxas foram então normalizadas para a escala do IPD e associadas a limites superiores distintos para cada cenário, que modulam a influência da vizinhança na probabilidade de conversão da vegetação nativa (tabela 1).

Cenário	Descrição	Base de cálculo	Taxa anual (km²/ano)	Anos de referência (PRODES)
Otimista	Redução percentual da taxa tendencial, simulando políticas ambientais efetivas e maior controle	80% da média recente	**6.512,60**	2018 – 2022 (ajustada)
Tendencial	Manutenção da taxa média recente	Média 2018–2022	**8.140,80**	2018 – 2022
Pessimista	Taxas de anos de pico, refletindo forte expansão da fronteira agropecuária	Média dos anos de pico	**11.551,00**	2013, 2014, 2015, 2022

Tabela 1 – Taxas de desmatamento do Cerrado utilizadas para calibrar os cenários de pressão. Fonte: autores (2025).

Após essa etapa, a influência das variáveis explicativas (declividade, distância a pastagem, agricultura, áreas urbanas, hidrografia e estradas) é incorporada para ajustar a probabilidade de transição para cada uma das classes disponíveis e estimar a provável transição do pixel em análise. Concluído o processamento, o novo mapa é salvo e o ciclo se repete para o próximo par de anos, permitindo a geração sequencial de mapas preditivos ao longo do tempo.

O IPD é fundamentado no conceito de matrizes de pesos espaciais, amplamente utilizadas para representar a dependência entre unidades territoriais adjacentes em estatística espacial (Zhou et al., 2008; Getis, 2004). Nessas matrizes, cada elemento wij expressa o grau de relação entre as localidades i e j, sendo um recurso essencial para modelar autocorrelação e efeitos espaciais. Em termos práticos, valores mais altos de IPD indicam forte influência de áreas preservadas sobre seu entorno, favorecendo a conectividade ecológica e reduzindo a probabilidade de conversão. Já valores mais baixos indicam menor influência das áreas vizinhas, favorecendo processos de fragmentação e maior vulnerabilidade à conversão. Essa lógica se aproxima dos efeitos de espalhamento espacial (spillover) discutidos por Zhang et al. (2023), que demonstram como o desmatamento em uma área pode influenciar negativamente áreas adjacentes.

Essa parametrização, calibrada com dados do PRODES, permite que o modelo capture padrões espaciais e temporais mais realistas, alinhando os resultados de simulação às tendências observadas no Cerrado nas últimas décadas.

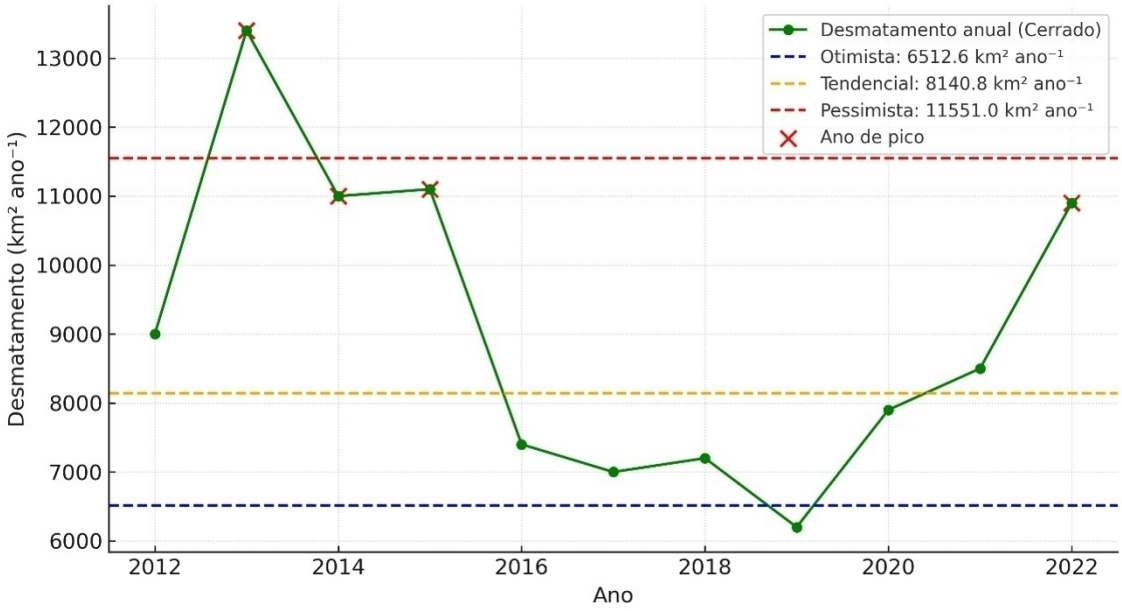

Figura 4 - Cenários de calibração do IPD baseados no PRODES – Cerrado. Fonte: autores (2025).

VALIDAÇÃO DE MODELO

Antes de gerar os cenários futuros, foi realizada uma etapa de validação do modelo. Para isso, foi simulado o mapa de 2023 com base nas transições observadas entre os anos de 2003 e 2013. O resultado foi comparado com o mapa real de 2023 para avaliar a acurácia do modelo.

Foram utilizados três métricas estatísticas: o índice de similaridade (Kappa), o erro médio absoluto (MAE) e o erro quadrático médio (RMSE) para avaliar a qualidade da previsão.

1- Erro Médio Absoluto (MAE – Mean Absolute Error) (Eq. 04):

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - \hat{y}_i| \qquad \text{Eq. 04}$$

Onde:

• yi é o valor observado,

• ŷi é o valor predito,

• n é o número total de observações.

2 - Erro Quadrático Médio (RMSE – Root Mean Square Error) (Eq. 05):

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2} \qquad \text{Eq. 05}$$

Onde:

• yi é o valor observado para o pixel i;

• ŷi é o valor previsto para o pixel i;

• n é o número total de pixels avaliados.

Assim como o MAE, o RMSE mede o desvio entre valores observados e previstos, mas penaliza mais fortemente erros maiores devido à elevação ao quadrado. Com a validação apresentando resultados satisfatórios, prosseguiu-se com a geração dos cenários futuros de uso e cobertura da terra até 2100.

ACURÁCIA

A acurácia é uma métrica amplamente utilizada para avaliar o desempenho de classificações temáticas, como mapas de uso e cobertura da terra. Ela representa a proporção de acertos do modelo em relação ao total de observações avaliadas, indicando o quão próximo os resultados da simulação estão da realidade observada ou do dado de referência. Trata-se de uma medida simples e direta, que resume a taxa global de concordância entre os dados classificados e os dados de validação. Dessa forma, valores de acurácia superiores a 90% são considerados excelentes, entre 80% e 90% são bons, entre 70% e 80% são aceitáveis, e abaixo de 70% indicam baixa confiabilidade.

A acurácia global (A) é calculada a partir da matriz de confusão, utilizando a seguinte fórmula (Eq. 06):

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_{ii}}{N} \qquad \text{Eq. 06}$$

Onde:

•xii representa os valores na diagonal principal da matriz de confusão (os acertos para cada classe),

•N é o número total de amostras avaliadas,

•n é o número total de classes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A validação dos modelos de simulação espacial aplicados ao bioma Cerrado foi conduzida com base em três métricas de desempenho amplamente utilizadas: acurácia (accuracy), erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (MSE). Os resultados obtidos foram consistentes entre os três cenários analisados: Otimista, Tendencial e Pessimista, evidenciando a estabilidade estrutural do modelo frente às variáveis utilizadas.

A acurácia dos modelos alcançou 0,97, indicando que aproximadamente 97% das transições simuladas coincidiram com os padrões observados no período de calibração, refletindo elevada capacidade de representação da dinâmica espacial histórica. O erro absoluto médio foi de 0,04, representando uma discrepância média de 4% entre os valores previstos e os reais. Já o erro quadrático médio foi de 0,09, valor que penaliza discrepâncias maiores e permanece dentro de uma faixa considerada adequada para modelos de simulação espacial de alta complexidade.

A homogeneidade dos resultados de validação entre os cenários indica que as variações na parametrização do Índice de Pressão de Desmatamento (IPD) afetam exclusivamente as projeções futuras, não comprometendo a capacidade do modelo de reproduzir o padrão espacial no período de referência. Esses resultados reforçam a robustez do modelo calibrado, validando sua aplicação para a geração de cenários de uso e cobertura da terra no Cerrado.

MUDANÇAS DE USO E COBERTURA DA TERRA DE 2030 A 2100 EM DIFERENTES CENÁRIOS

Os cenários preditivos indicam dinâmicas contrastantes para o Cerrado no período de 2030 a 2100, refletindo diferenças tanto na intensidade da conversão da vegetação nativa quanto na expansão dos usos antrópicos. A Tabela 2 apresenta as áreas absolutas por classe de uso e cobertura da terra em cada cenário e ano, enquanto a Figura 5 ilustra a distribuição espacial dessas mudanças, evidenciando os padrões regionais de expansão e retração das diferentes classes.

No cenário Otimista, a vegetação nativa reduz-se de 973.101 km² em 2030 para 918.967 km² em 2050 e 855.532 km² em 2100. Apesar dessa perda, o bioma mantém 40% de cobertura natural ao final do período. A pastagem é o uso antrópico predominante, ocupando 556.140 km² em 2030 e atingindo 605.568 km² em 2100, seguida pela agricultura, que passa de 490.687 km² para 538.461 km² no mesmo intervalo. A expansão urbana é residual, com aumento de apenas 23.677 km² ao longo de todo o século. Esse cenário reflete avanços limitados sobre novas áreas e manutenção de mosaicos onde atividades agropecuárias coexistem com remanescentes de vegetação.

O cenário Tendencial apresenta redução mais intensa da vegetação, de 922.668 km² em 2030 para 795.818 km² em 2050 e 721.560 km² em 2100, restando 34% de cobertura natural. A pastagem predomina entre os usos antrópicos, crescendo de 582.901 km² para 676.656 km², enquanto a agricultura aumenta de 515.824 km² para 604.935 km². Nesse caso, a expansão das áreas produtivas é mais equilibrada entre pastagem e agricultura, sugerindo manutenção das dinâmicas atuais de conversão, com avanços sobre áreas de vegetação savânica e campestre em zonas de alta aptidão agrícola.

No cenário Pessimista, a vegetação nativa sofre redução acentuada: de 799.366 km² em 2030 para 485.149 km² em 2050 e 398.004 km² em 2100, correspondendo a apenas 18% do bioma. Ao final do período, a pastagem domina amplamente, alcançando 849.541 km², seguida pela agricultura com 763.479 km², o que equivale a 78% de todo o bioma. O avanço dessas duas classes representa substituição maciça da vegetação remanescente, restando áreas naturais concentradas em enclaves isolados, unidades de conservação permanentes ou regiões de menor viabilidade agrícola.

Ano	Cenário	Vegetação	Pastagem	Agricultura	Mancha urbana	Água
2030	Otimista	973.101,84	556.140,41	490.687,18	33.676,98	14.223,66
2030	Tendencial	922.667,65	582.900,58	515.824,34	32.695,80	13.741,70
2030	Pessimista	799.365,72	648.046,40	576.355,25	31.458,47	12.604,24
2050	Otimista	918.966,86	579.165,93	513.025,01	44.023,90	13.273,37
2050	Tendencial	795.818,22	644.893,85	574.003,69	41.823,31	11.916,00
2050	Pessimista	485.149,24	810.701,88	725.881,36	38.350,97	8.371,62
2100	Otimista	855.532,01	605.568,42	538.460,94	57.353,95	12.164,37
2100	Tendencial	721.560,30	676.655,67	604.934,95	55.286,76	10.642,01
2100	Pessimista	398.003,78	849.540,51	763.479,32	51.202,38	6.853,71

Tabela 2 - Áreas (em km²) por classe de uso e cobertura da terra no Cerrado para os cenários Otimista, Tendencial e Pessimista em 2030, 2050 e 2100.

A comparação entre cenários confirma que a pastagem e a agricultura são o uso antrópico dominantes no Cerrado. No cenário Otimista, a diferença entre ambas é menor; no Tendencial, predomina um equilíbrio; e no Pessimista, a pastagem se amplia de forma expressiva, distanciando-se significativamente da agricultura. A análise espacial indica que as áreas mais suscetíveis à conversão se concentram nas porções centrais e ocidentais do bioma, associadas a solos férteis e à proximidade de eixos logísticos. Esse padrão corrobora estudos que apontam a pecuária extensiva como principal vetor de conversão no Cerrado nas últimas décadas (Sano et al., 2019; Strassburg et al., 2017) e reforça a sobreposição entre zonas de alta aptidão agrícola e áreas de maior pressão antrópica (Vieira et al., 2021).

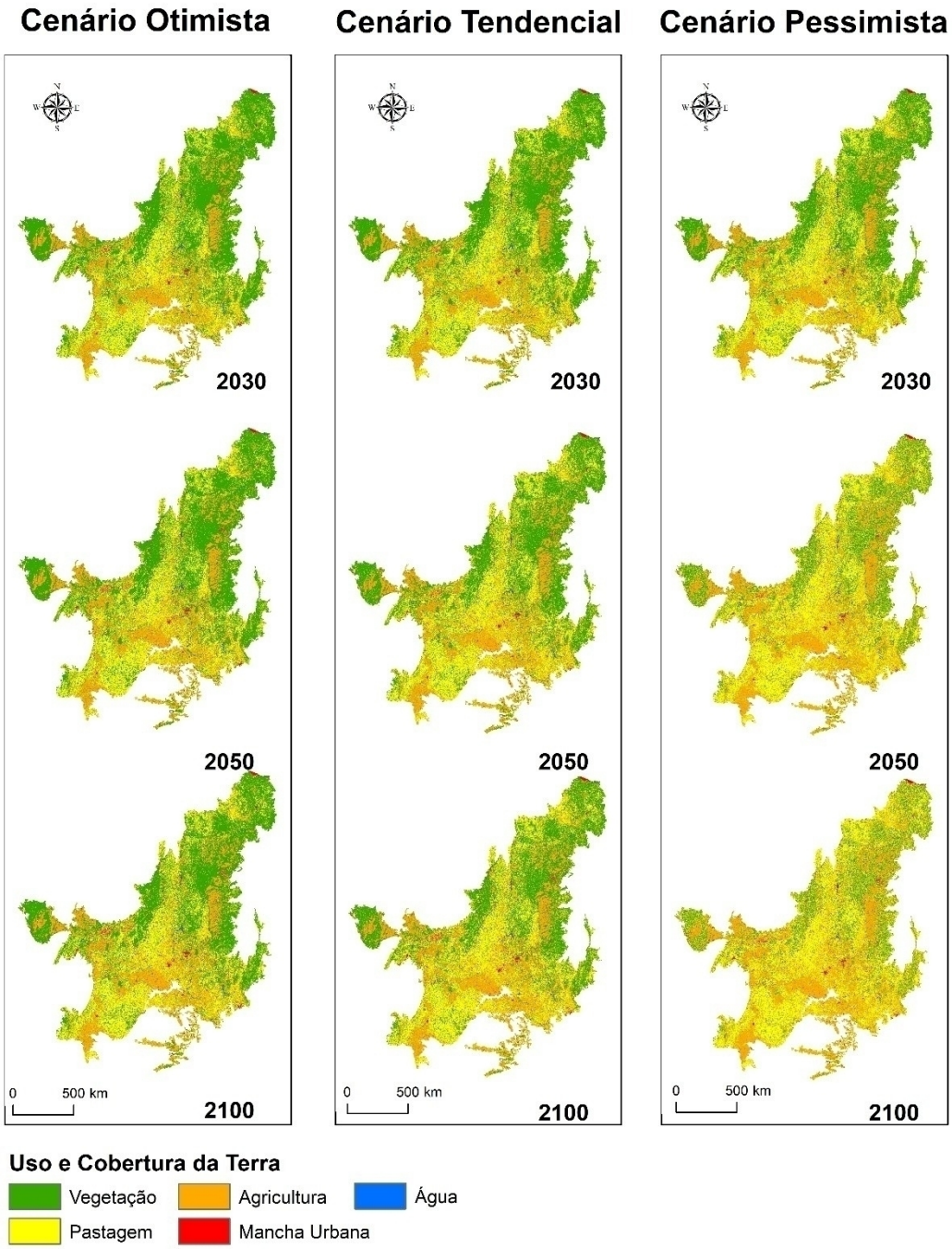

Figura 5 – Distribuição espacial do uso e cobertura da terra no Cerrado para os cenários Otimista, Tendencial e Pessimista, nos anos de 2030, 2050 e 2100.

PRESSÕES E VULNERABILIDADES NO CERRADO

O Cerrado é o bioma brasileiro com maior déficit de Reserva Legal, concentrando cerca de 42.000 km² de vegetação nativa que necessitam ser recuperados (Guidotti et al.). Além disso, apenas 8,3% de sua extensão está formalmente protegida. Essa condição de baixa proteção, somada ao déficit ambiental, tem sido agravada pelo destaque do bioma na produção e exportação de grãos e carnes, o que o consolidou como uma das principais fronteiras agrícolas do mundo (FAO).

Esse cenário explica, em parte, as elevadas taxas recentes de desmatamento observadas no bioma. De acordo com o RAD 2024 (Mapbiomas, 2025), o Cerrado foi responsável por 60,4% de toda a área desmatada no Brasil em 2023 (11.098,50 km²) e, mesmo após uma redução de 41,2% no ano seguinte, ainda concentrou 52,5% do total nacional (6.521,97 km²), mantendo-se como o bioma mais impactado. Essa pressão está fortemente associada à expansão agropecuária, que responde por mais de 97% da perda de vegetação nativa no país nos últimos seis anos.

Os dados do Monitor do Crédito Rural (Mapbiomas, 2024) reforçam esse quadro ao mostrar que estados do Cerrado, como Mato Grosso do Sul e Tocantins, possuem as maiores médias de área financiada por operação com recursos públicos (1,72 km²) e concentram uma parte expressiva das glebas financiadas que apresentam sobreposição com desmatamento. Entre 2019 e 2024, 98.000 km² de glebas financiadas no Brasil apresentaram algum nível de sobreposição com áreas desmatadas, sendo 67% dessas operações destinadas à lavoura e 25% à bovinocultura.

Dessa forma, nosso estudo acrescenta mais evidências de que, sob a estrutura de proteção ambiental existente, o hotspot do Cerrado enfrentará rápidas mudanças no uso da terra nos próximos anos, sendo determinantes as medidas ambientais no contexto atual para um futuro menos preocupante em relação as áreas remanescentes.

Nossos modelos indicam que a trajetória futura do Cerrado dependerá diretamente das taxas anuais de desmatamento e da efetividade das políticas de controle. No cenário otimista, calibrado com taxas 20% menores que a média recente (6.512,6 km²/ano), observa-se uma desaceleração na perda de vegetação nativa e manutenção de corredores ecológicos mais extensos, favorecendo a conectividade e a resiliência do bioma. No cenário tendencial (8.140,8 km²/ano), os padrões recentes de conversão se mantêm, resultando em perdas expressivas, mas com alguma preservação de áreas estratégicas. Já no cenário pessimista, baseado na média dos anos de pico do PRODES (11.551,0 km²/ano), há forte aceleração da fragmentação e redução crítica das áreas contínuas de vegetação, especialmente nas bordas das frentes de expansão agropecuária.

Entre 2030 e 2050, os modelos projetam taxas médias anuais de desmatamento de –2.707 km²/ano no cenário otimista, –6.342 km²/ano no tendencial e –15.711 km²/ano no pessimista, indicando que as maiores perdas ocorrem nas próximas duas décadas. Esses valores se aproximam das dinâmicas observadas: nos últimos anos, segundo o PRODES e o RAD MapBiomas, o Cerrado apresentou taxas anuais entre 6.000 e 11.000 km²/ano, com um pico de mais de 11.000 km² em 2023, consolidando-se como o bioma mais desmatado do Brasil. Nesse contexto, o cenário tendencial reproduz de forma realista a média recente, enquanto o pessimista representa uma intensificação ainda maior da pressão agropecuária.

Já o cenário otimista, com cerca de –2.707 km²/ano até 2050, encontra respaldo nos valores históricos analisados por Miziara e Ferreira (2008), que estimavam taxas em torno de 2.000 a 3.000 km²/ano nas décadas de 1990 e início dos anos 2000. Isso sugere que, sob políticas ambientais mais efetivas e controle da expansão desordenada, seria possível retomar patamares semelhantes aos do passado. Após 2050, observa-se uma desaceleração relativa das taxas em todos os cenários — caindo para –1.269 km²/ano (otimista), –1.485 km²/ano (tendencial) e –1.743 km²/ano (pessimista) até 2100. Essa redução, contudo, não reflete menor pressão antrópica, mas sim a diminuição das áreas remanescentes passíveis de conversão, já que a maior parte da vegetação nativa teria sido suprimida até meados do século.

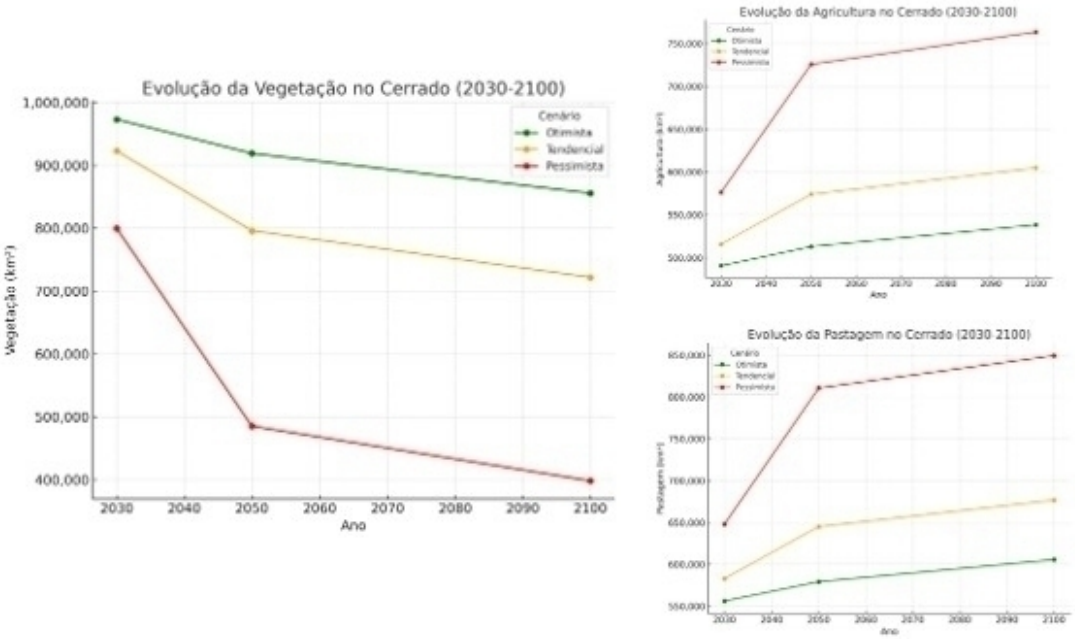

Figura 6 - Projeções da evolução da vegetação nativa, pastagens e agricultura no Cerrado entre 2030 e 2100 sob três cenários de desmatamento. Fonte: autores (2025).

A análise das trajetórias futuras mostra que, embora o ritmo de perda varie entre os cenários, todos apontam para um declínio contínuo da vegetação nativa até 2100, acompanhado pela expansão de áreas agropecuárias. No cenário otimista, a retração da vegetação é menos acentuada, mantendo aproximadamente 82% da cobertura original em 2050, enquanto o cenário tendencial cai para 76% e o pessimista para 68%. Esses valores contrastam com os resultados de Ferreira et al. (2013), que projetaram manutenção de cerca de 87% da vegetação nativa em 2050. A diferença pode ser explicada pelo agravamento recente das taxas de desmatamento, que têm oscilado entre 6.000 e 11.000 km²/ano segundo PRODES e RAD MapBiomas, muito acima das médias históricas observadas nas décadas de 1990 e 2000. Dessa forma, nossos modelos reforçam que, sem uma inflexão nas políticas de controle e no financiamento da expansão agropecuária, a perda de áreas remanescentes do Cerrado tende a ser mais acelerada do que o previsto em cenários anteriores.

RESILIÊNCIA ECOLÓGICA E VULNERABILIDADE CLIMÁTICA DO CERRADO FRENTE AS SECAS EXTREMAS E RETROCESSOS INSTITUCIONAIS

Os resultados apresentados para os cenários futuros do Cerrado (2030–2100) evidenciam a convergência entre forçantes climáticas extremas, perda de cobertura vegetal e fragilidades institucionais, configurando um quadro de alta vulnerabilidade ecológica. O bioma, que ocupa papel estratégico na regulação hídrica nacional e na estabilidade climática sul-americana (Oliveira et al., 2019), mostra sinais de aproximação de um limiar de colapso funcional, no qual os mecanismos naturais de resiliência já não são suficientes para garantir o equilíbrio dos processos ecológicos essenciais.

Em escala global, Ohlert et al. (2025) demonstraram que a intensidade e a duração das secas interagem de forma não linear, amplificando de modo expressivo as perdas na produtividade primária terrestre. A análise de 74 ecossistemas de pastagens e savanas mostrou que, embora alguns sistemas se aclimatem parcialmente à seca plurianual, essa capacidade colapsa sob eventos extremos, com perdas acumuladas de produtividade 2,5 vezes superiores após quatro anos consecutivos de seca. Esse padrão é particularmente relevante para o Cerrado, cuja dinâmica depende da reciclagem de umidade e da profundidade radicular da vegetação nativa. A substituição dessa vegetação por culturas anuais e pastagens compactadas altera a estrutura do solo, reduz a infiltração e compromete a recarga hídrica,

tornando o bioma mais suscetível aos efeitos combinados da seca e do uso intensivo da terra (Sano et al., 2019; Colman et al., 2024).

De forma complementar, Rosenfield et al. (2025) mapearam a resiliência paisagística ao clima em escala nacional e identificaram o Cerrado como um dos biomas com maior proporção de áreas de baixa resiliência climática, atingindo cerca de 37% do território. Essa vulnerabilidade decorre da alta fragmentação, da homogeneização da paisagem e da perda de conectividade ecológica — fatores que reduzem a diversidade de microclimas e a dispersão de espécies, elementos essenciais para a estabilidade ecológica. Tais processos refletem a substituição progressiva da vegetação nativa por monocultivos e pastagens, concentrados em regiões de solos férteis e infraestrutura consolidada, como também observaram Strassburg et al. (2017) e Vieira et al. (2021). O resultado é um mosaico ambiental com baixa capacidade de reorganização ecológica frente às perturbações climáticas, o que amplia o risco de colapso funcional em escalas regionais.

Paralelamente, o avanço de mudanças normativas e políticas ambientais regressivas tem contribuído para agravar esse quadro. Araújo et al. (2025) evidenciam que a promulgação da Lei nº 22.017/2023 em Goiás representa um dos maiores retrocessos ambientais recentes. A legislação flexibiliza o Código Florestal estadual, permitindo o desmatamento de fragmentos de até 2 hectares, incluindo áreas ecologicamente sensíveis como murundus e capões, além de redefinir como "consolidadas" áreas desmatadas até 2019 — na prática, anistiando mais de uma década de supressões ilegais. Essa flexibilização reduz a proteção das formações vegetais mais frágeis, desestrutura a conectividade ecológica e enfraquece o princípio constitucional da vedação ao retrocesso ambiental, comprometendo compromissos nacionais como o Planaveg e as metas de zero desmatamento até 2030.

A conjunção entre mudanças climáticas, baixa resiliência da paisagem e retrocesso institucional reforça a ideia de que o Cerrado atravessa um processo de erosão sistêmica. Os resultados desta tese, que apontam redução de até 82% da vegetação nativa sob o cenário pessimista, convergem com estudos anteriores que já projetavam declínio acentuado da cobertura natural caso não houvesse inflexão nas políticas de controle (Ferreira et al., 2013; Lapola et al., 2014). Em linha com os achados de Ohlert et al. (2025), as perdas de produtividade associadas a secas severas e prolongadas podem atuar como gatilhos de transições ecológicas irreversíveis, levando o bioma à substituição por paisagens empobrecidas e de baixa capacidade de sequestro de carbono. Essa tendência pode ser agravada pela persistência do financiamento público de atividades agropecuárias em áreas de alta pressão antrópica, como demonstram os dados recentes do Monitor do Crédito Rural (Mapbiomas, 2024).

Para enfrentar esse cenário, é urgente rearticular políticas públicas multiescalares que integrem conservação, restauração e governança territorial. A revogação de legislações permissivas, como a Lei nº 22.017/2023, e o fortalecimento de instrumentos de monitoramento como o PRODES/Cerrado e o MapBiomas RAD, são medidas centrais para conter a degradação. A identificação de áreas de alta resiliência (Rosenfield et al., 2025) pode orientar esforços de restauração ecológica e conectividade entre fragmentos, promovendo corredores de vegetação capazes de sustentar fluxos biológicos e mitigar o impacto das secas extremas. Tais ações devem ser acompanhadas de incentivos econômicos e fiscais para a recomposição florestal e de políticas de valorização da vegetação nativa como infraestrutura natural de adaptação climática (Gibbs et al., 2015; Soterroni et al., 2019).

Em síntese, o Cerrado se encontra em uma zona crítica de transição, na qual a continuidade das tendências atuais poderá comprometer de forma irreversível sua função ecológica, climática e social. Proteger o Cerrado é garantir a estabilidade hídrica e climática do país, a manutenção da biodiversidade e a segurança alimentar das futuras gerações (Klink; Machado, 2005; Silva et al., 2002). A convergência entre ciência, política e gestão territorial é, portanto, o caminho indispensável para que o bioma continue a sustentar a vida e a produção no século XXI.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o futuro do Cerrado dependerá diretamente da interação entre as taxas anuais de desmatamento e a efetividade das políticas públicas de controle ambiental. O cenário otimista, calibrado com taxas 20% inferiores à média recente, projeta a manutenção de corredores ecológicos mais contínuos e uma desaceleração da perda de vegetação nativa,

indicando que, sob políticas mais efetivas, seria possível retomar patamares próximos aos observados nas décadas de 1990 e início dos anos 2000. O cenário tendencial, por sua vez, reproduz de forma realista a média recente, mantendo perdas expressivas, mas ainda com alguma preservação de áreas estratégicas. Já o cenário pessimista projeta forte aceleração da fragmentação e da redução das áreas contínuas de vegetação, refletindo o avanço desordenado da fronteira agropecuária.

As projeções até 2050 revelam que as maiores perdas ocorrem nas próximas duas décadas, convergindo com estudos anteriores (Miziara e Ferreira, 2008; Ferreira et al., 2013; Guidotti et al., 2020), que também apontaram o Cerrado como uma das áreas mais vulneráveis do país. Após esse período, observa-se uma desaceleração relativa das taxas de desmatamento em todos os cenários, não em função da diminuição da pressão antrópica, mas da escassez de áreas remanescentes a serem convertidas. Esse padrão reforça o risco de se atingir pontos de não retorno, em que a resiliência ecológica ficará severamente comprometida.

Do ponto de vista metodológico, este trabalho contribui ao integrar um modelo de simulação espacial desenvolvido em Python, fundamentado em cadeias de Markov, pesos de evidência e autômatos celulares, calibrado com dados do PRODES/INPE. Permitindo maior automatização, transparência metodológica e integração de múltiplas variáveis explicativas em simulações de longo prazo.

No âmbito das políticas públicas, nossos resultados reforçam a necessidade de revisão da estrutura de proteção no Cerrado. O déficit de Reserva Legal, estimado em 42.000 km², somado ao baixo percentual de áreas formalmente protegidas (apenas 8,3%), limita a resiliência do bioma. A vinculação de parte do desmatamento a operações de crédito rural público revela incoerências estruturais entre a promoção do agronegócio e a conservação ambiental.

Este trabalho não deve ser interpretado como previsão determinística, mas como exercício prospectivo capaz de iluminar alternativas e riscos. Reconhece-se, contudo, que há limitações, especialmente quanto à capacidade de antecipar variáveis socioeconômicas e políticas com uma escala temporal longa. Ainda assim, as simulações apontam caminhos claros: fortalecimento das políticas de comando e controle; ampliação das áreas protegidas e regularização da Reserva Legal; e alinhamento entre financiamento agrícola e sustentabilidade.

Em síntese, o futuro do Cerrado permanece em aberto. O cenário otimista mostra que ainda é possível conter a perda de vegetação e preservar a resiliência ecológica do bioma. O cenário pessimista, por outro lado, alerta para uma trajetória de fragmentação e esgotamento de capital natural. Cabe à sociedade, ao setor produtivo e ao poder público decidir qual desses caminhos será trilhado.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida ao primeiro autor. Os autores também agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa concedida ao segundo autor (Processo nº 317013/2023-8).

DISPONIBILIDADE DE DADOS

Não aplicável

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, L. M. de et al. Law 22.017/2023: a dire threat to the Cerrado's survival and Brazil's environmental leadership. Environmental Development, v. xx, p. 1–12, 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Cadastro Nacional de Unidades de Conservação (CNUC). 2023. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br. Acesso em: 10 jun. 2025.

COLMAN, C. C. et al. Dinâmica recente do uso da terra no Cerrado: tendências e implicações para a conservação. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 2, p. 455–470, 2024.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Global forest resources assessment 2010: main report. Rome: FAO, 2010.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA, L. G.; MIZIARA, F.; SOARES-FILHO, B. S. Modeling landscape dynamics in the central Brazilian savanna biome: future scenarios and perspectives for conservation. Journal of Land Use Science, v. 8, p. 403–421, 2013.

GIBBS, H. K. et al. Brazil's Soy Moratorium. Science, v. 347, n. 6220, p. 377–378, 2015.

GIBBS, H. K. et al. Did Ranchers and Slaughterhouses Respond to Zero-Deforestation Agreements in the Brazilian Amazon? Conservation Letters, v. 9, n. 1, p. 32–42, 2016.

KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. Conservação do Cerrado brasileiro. Conservation Biology, v. 19, n. 3, p. 707–713, 2005.

LAPOLA, D. M. et al. Generalized land use change in the Brazilian land use system. Nature Climate Change, v. 4, p. 27–35, 2014.

MAPBIOMAS. Coleção 9 da série anual de mapas de cobertura e uso do solo do Brasil. São Paulo: MapBiomas, 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org/. Acesso em: 10 jun. 2025.

OHLERT, T. et al. Intensity and duration of drought interact to amplify losses in terrestrial primary productivity. Science, v. 390, p. 284–289, 2025.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Nexo água-alimento-energia-serviços ecossistêmicos no Cerrado brasileiro. In: DA SILVA, R. C. V. et al. (org.). Água e clima: modelagem em grandes bacias. Porto Alegre: ABRHidro, 2019. p. 7–35.

ROSENFIELD, M. F. et al. Mapping resilient landscapes to climate change in a megadiverse country. Global Change Biology, v. xx, p. 1–15, 2025.

SANO, E. E. et al. Land use dynamics in the Brazilian Cerrado in the period from 2000 to 2015. Land Use Policy, v. 87, p. 104062, 2019.

SILVA, J. M. C. et al. The Brazilian Cerrado: a biodiversity hotspot. In: MITTERMEIER, R. A. et al. (ed.). Hotspots revisited: Earth's biologically richest and most endangered terrestrial ecoregions. Washington, DC: CEMEX, 2002. p. 149–154.

SOTERRONI, A. C. et al. Expanding the Soy Moratorium to Brazil's Cerrado. Science Advances, v. 5, n. 7, eaat7236, 2019.

STRASSBURG, B. B. N. et al. Moment of truth for the Cerrado hotspot. Nature Ecology & Evolution, v. 1, p. 0099, 2017.

VIEIRA, R. R. S. et al. The loss of native vegetation in Brazilian protected areas. Biological Conservation, v. 255, p. 108979, 2021.

ZHANG, R. et al. Study on the spatial spillover effect of land use type change. Scientific Reports, v. 13, n. 14456, 2023.

ZHOU, X. et al. Spatial Weights Matrix. In: SHEKHAR, S.; XIONG, H. (eds). Encyclopedia of GIS. Boston, MA: Springer, 2008. p. 1127–1131.

Afiliação dos Autores

Frazão, A.P.R.F. - Pesquisadora do Projeto ONSEAdapta, Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba (SP), Brasil.
Ferreira, M.E. - Professor da Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia (GO), Brasil.
Santos, S.V. - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal (RN), Brasil.
Sousa, S.B. - Professora da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal (RN), Brasil.

Contribuição dos Autores

Frazão, A.P.R.F. - A autora contribuiu para a concepção e o delineamento do estudo, o processamento e a análise de dados, a modelagem de cenários, a produção de mapas, a interpretação dos resultados e a redação do manuscrito.
Ferreira, M.E. - O autor contribuiu para a concepção e o delineamento do estudo, a metodologia, a supervisão, a interpretação dos resultados e a redação do manuscrito.
Santos, S.V. - O autor contribuiu para o processamento de dados, a modelagem de cenários, a elaboração de tabelas e figuras e a redação do manuscrito.
Sousa, S.B. - A autora contribuiu para o desenvolvimento da metodologia, análise de dados, interpretação dos resultados e revisão do manuscrito.

Editores Responsáveis

Alexandre Queiroz Pereira
Eduardo Von Dentz