

ANÁLISE PROSPECTIVA DA DINÂMICA AMBIENTAL EM FORMOSA (GO): USO DE AUTÔMATOS CELULARES NA EVOLUÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO PARA OS ANOS DE 2026 E 2031

Wagner Santos de Almeida¹, Mariana dos Santos Diniz², Juan Pablo Catamusca Salazar³

(1 – Universidade de Brasília, wagnersa_98@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-6359-4334>; 2 – Universidade de Brasília, marianadiniz12@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1409-2973>; 3 – Universidad Abierta y a Distancia, juan.catamusca@unad.edu.co, <https://orcid.org/0000-0002-1364-1371>)

Resumo: A ocupação urbana no Brasil concentra-se em menos de 1% do território, onde reside 87,4% da população que enfrenta desafios como a falta de reforma agrária e saneamento básico. Desde a migração da Capital Federal para Brasília em 1960, municípios como Formosa (GO) registraram crescimento populacional significativo. Este artigo tem como objetivo obter cenários prospectivos de uso e cobertura do solo em Formosa para os anos de 2026 e 2031. Para isto foram usadas imagens de sensoriamento orbital dos anos de 2013, 2017 e 2021 processadas nos *softwares* SPRING e ArcGIS que, associados com os mapas intermediários de declividade, distância de drenagem e de estradas, permitiram a geração dos cenários prospectivos no *software* Dinamica EGO. A análise do uso e cobertura do solo entre 2013 e 2021 revelou degradação significativa, com a mata ciliar diminuindo de 16,14% para 11%, enquanto a área urbana cresceu de 27,74% para 31,71%. Os cenários para 2026 e 2031 indicam intensificação da urbanização e perda contínua da vegetação nativa, exacerbando problemas como enchentes e assoreamento. Este estudo pode subsidiar a atualização do Plano Diretor Municipal, e sua metodologia é replicável para outros municípios brasileiros.

Palavras Chaves: Autômatos Celulares, Geoprocessamento, Cenários Prospectivos.

PROSPECTIVE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL DYNAMICS IN FORMOSA (GO): USING CELLULAR AUTOMATA IN THE EVOLUTION OF LAND USE AND COVER FOR THE YEARS 2026 AND 2031

Abstract: The urban occupation in Brazil is concentrated in less than 1% of the territory, where 87.4% of the population resides under constant pressures such as the lack of agrarian reform and basic sanitation. Since the change in the national capital from Rio de Janeiro to Brasília in 1960, municipalities like Formosa in the State of Goiás have experienced significant population growth. This article aims to generate prospective scenarios of land use and land cover in Formosa for the years 2026 and 2031. To achieve this, satellite images from 2013, 2017, and 2021 of the subject area were processed using SPRING and ArcGIS software. These images, combined with intermediate maps of slope, distance to drainage, and distance to roads, enabled the exploration of prospective scenarios using the Dinamica EGO software. The analysis of land use and land cover between 2013 and 2021 revealed significant degradation, with riparian forests decreasing from 16.14% to 11%, whilst urban areas expanded from 27.74% to 31.71%. The likely scenarios for 2026 and 2031 indicate intensified urbanization and continued loss of native vegetation, exacerbating issues such as floods and siltation. This study can support the update of the Municipal Master Plan, its methodology can be replicable to other Brazilian municipalities.

Keywords: Cellular Automata, Geoprocessing, Prospective Scenarios.

**ANÁLISIS PROSPECTIVA DE LA DINÁMICA AMBIENTAL EN FORMOSA (GO):
USO DE AUTÓMATOS CELULARES EN LA EVOLUCIÓN DEL USO Y
COBERTURA DEL SUELO PARA LOS AÑOS 2026 Y 2031**

Resumen: La ocupación urbana en Brasil se concentra en menos del 1% del territorio, donde vive el 87,4% de la población, enfrentando desafíos como la falta de reformas agrarias y saneamiento básico. Desde el traslado de la Capital Federal para Brasilia en 1960, municipios como Formosa (GO) han registrado un importante crecimiento poblacional. Este artículo tiene como objetivo obtener escenarios prospectivos de uso y cobertura del suelo en Formosa para los años 2026 y 2031. Para ello, fueron utilizadas imágenes satelitales de los años 2013, 2017 y 2021 del área de estudio, procesadas en los softwares SPRING y ArcGIS que, asociados con los mapas de pendiente, distancia de los ríos y vías, permitió la generación de los escenarios prospectivos en el software Dinamica EGO. El análisis del uso y cobertura del suelo entre los

años 2013 y 2021 evidenció una degradación significativa, pues el bosque ripario disminuyó del 16,14% al 11%, mientras que el área urbana aumentó del 27,74% al 31,71%. Los escenarios para los años 2026 y 2031 indican una mayor urbanización y una pérdida continua de la vegetación nativa, agravando problemas como las inundaciones y la sedimentación. Este estudio puede apoyar la actualización del plan maestro municipal, y su metodología es replicable para otros municipios brasileños.

Palabras Clave: Urbanización, Autómatas Celulares, Geoprocesamiento, Escenarios Prospectivos

Introdução

A ocupação antrópica do espaço territorial no Brasil é essencialmente urbana e extremamente concentrada, abrangendo menos de 1% do território nacional e abrigando mais de 177 milhões de pessoas, ou seja, 87,4% da população brasileira, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em seu censo de 2022 (IBGE, 2023). Essa realidade deve-se a problemas crônicos diversos, incluindo a falta de uma política eficaz de reforma agrária; as ações de grilagem e o favelamento nas periferias dos centros urbanos; bem como, a ocupação desordenada de encostas com significativa supressão da vegetação nativa; e deficiências em saneamento básico e eletrificação. Esses fatores, combinados, resultam em impactos socioeconômicos e ambientais negativos, que representam grandes desafios para a formulação de políticas públicas de planejamento urbano mais eficazes.

Com o estabelecimento de Brasília como a Capital Federal do Brasil em 1960, houve uma proeminente migração antrópica interestadual. Esse processo de migração acentuou a ocupação de regiões próximas ao Distrito Federal do Brasil, como o município de Formosa (GO). Segundo a Pesquisa Metropolitana por Amostra de Domicílios (PMAD) (Codeplan, 2014), em 2010, a população de Formosa era de 100.085 pessoas, das quais 92.023 viviam na área urbana. Em 2022, o Censo revelou que a população de Formosa atingiu 115.669 pessoas, um crescimento de 15,57% em relação ao ano de 2010, resultando na expansão da ocupação antrópica em direção às áreas rurais, causando desmatamento da vegetação nativa, a ocupação irregular de encostas, a deterioração na qualidade das águas e uso inadequado do solo. Isso resultou em problemas como a compactação e impermeabilização do solo, o aumento do escoamento superficial e a ocorrência de processos erosivos e inundações. Impactos ambientais

dessa ordem intensificam negativamente a vulnerabilidade ambiental e, muitas vezes, não são previstos em planos diretores municipais.

A evolução do uso e cobertura do solo ao longo de um período serve como importante indicador para mensuração do avanço antrópico sobre um território, além de ser um dos principais subsídios do uso de modelos empíricos de processos erosivos e de diagnóstico de sua vulnerabilidade ambiental. Essa evolução do uso e cobertura do solo pode ser mensurada e representada cartograficamente por meios de mapas obtidos a partir de algoritmos de processamento de imagens de sensores remotos, orbitais e aéreos e, permite, sobretudo, visualizar as interferências antrópicas sobre o território, fundamental diante da intensificação dos impactos ambientais citados ao longo dos últimos anos.

A modelagem da dinâmica espacial de uso e ocupação do solo é útil para a ação do planejamento territorial e, torna possível a compreensão da tendência de expansão e retração de diferentes usos do território, permitindo prever os impactos e as áreas críticas, como forma de subsidiar à implementação de ações preventivas. Para obtenção dessa modelagem da dinâmica espacial, os autômatos celulares (AC) são bastante utilizados, devido a sua capacidade de representar e simular complexos sistemas dinâmicos de maneira simples, versátil e intuitiva e, devido a sua arquitetura de discretização do espaço-tempo, os AC também são utilizados em modelos geográficos e com dados espaciais, utilizando conjuntamente com algoritmos de Inteligência Artificial (IA), como as redes neurais e as cadeias de Markov (Chakraborty *et al.*, 2022).

Assim, para subsidiar o planejamento urbano de ocupação do território, utilizam-se os cenários prospectivos do uso e cobertura do solo que permitem prever, baseado na expansão urbana em um determinado período, como será o seu uso futuro. Para isto, utilizam-se plataformas com algoritmos de geoprocessamento de simulação ambiental baseados em AC e na modelação estocástica (Dioşan *et al.*, 2017). Alguns estudos relevantes foram realizados utilizando algoritmos de AC para modelar a dinâmica de uso e cobertura do solo em áreas urbanas (Rossetti *et al.*, 2013; Yadav *et al.*, 2024). Como exemplo da aplicabilidade dos AC, tem-se sua utilização na simulação de cenários de desflorestamento na Região Amazônica (Ghilardi *et al.*, 2016) e na determinação do coeficiente do Número da Curva (CN-*Curve Numbers*), fundamental em estudos hidrológicos (Albuquerque *et al.*, 2024).

Atualmente, com avanço da tecnologia computacional que inclui o desenvolvimento da Inteligência Artificial (IA), diversos modelos de AC híbridos têm sido desenvolvidos como

AC-Markov, AC- regressão logística, AC- fuzzy e AC- redes neurais (Chakraborty *et al.*, 2022; Zhang & Böleskei, 2024). Essas extensões são aplicadas nas regras de transições dos AC, como nos estudos: cadeias de Markov e regressão logística na análise do crescimento urbano, respectivamente em Oliveira *et al.*, (2021) e Cao *et al.*, (2020), aplicação de algoritmo de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) na detecção de áreas potenciais de deslizamento de terra (Ramos-Bernal *et al.*, 2024) e aplicação de redes neurais artificiais nas mudanças de dinâmica espacial (Basse *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2022).

No problema de pesquisa com ocupação do território em um cenário de expansão antrópica crescente, como é o caso do município de Formosa (GO), com seus impactos ambientais negativos decorrentes dessa expansão, é fundamental avaliar a dinâmica do uso e cobertura solo ao longo dos anos, para subsidiar a elaboração de cenários prospectivos, do tipo tendencial-inercial, que apresente cartograficamente como será a evolução futura da ocupação territorial e consequentes danos, caso não sejam implantadas medidas mitigadoras para atenuar os efeitos dessa expansão antrópica que, normalmente, ocorre de forma desordenada, uma marca dos municípios no entorno do Distrito Federal.

O município de Formosa (GO) já foi objeto de estudos sobre a sua vulnerabilidade ambiental (Salazar, 2015) e aptidão à expansão urbana (Lara *et al.*, 2017). Este artigo busca complementar esses estudos existentes, utilizando imagens de sensores remotos orbitais de alta resolução espacial capturadas nos meses da mesma estação sazonal anual, analisadas em diferentes períodos para verificar a influência do tempo adotado nas simulações futuras.

A metodologia desenvolvida neste artigo, que pode ser replicada em outros municípios do País, tem como objetivo principal obter cenários prospectivos do uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031. Isso foi feito com base na evolução multi-temporal do uso e cobertura do solo do município de Formosa, por meio do emprego de autômatos celulares, utilizando cadeias de Markov em uma plataforma de determinação da dinâmica ambiental. A análise prospectiva desses cenários considera a evolução do uso e cobertura do solo no período entre os anos de 2013 a 2021.

Os resultados, além de terem sido comparados com pesquisas existentes na região, são cruciais para auxiliar e embasar a atualização do Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado do município de Formosa (GO), proposto em 2004 e instituído pela Lei Ordinária nº 251, de 20 de dezembro de 2004. Este Plano passou por várias revisões e atualizações por meio de leis complementares ao longo dos anos, culminando na Lei Complementar nº 42, de 28 de dezembro

de 2022, que revogou integralmente a Lei Ordinária de 2004 e instituiu o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado.

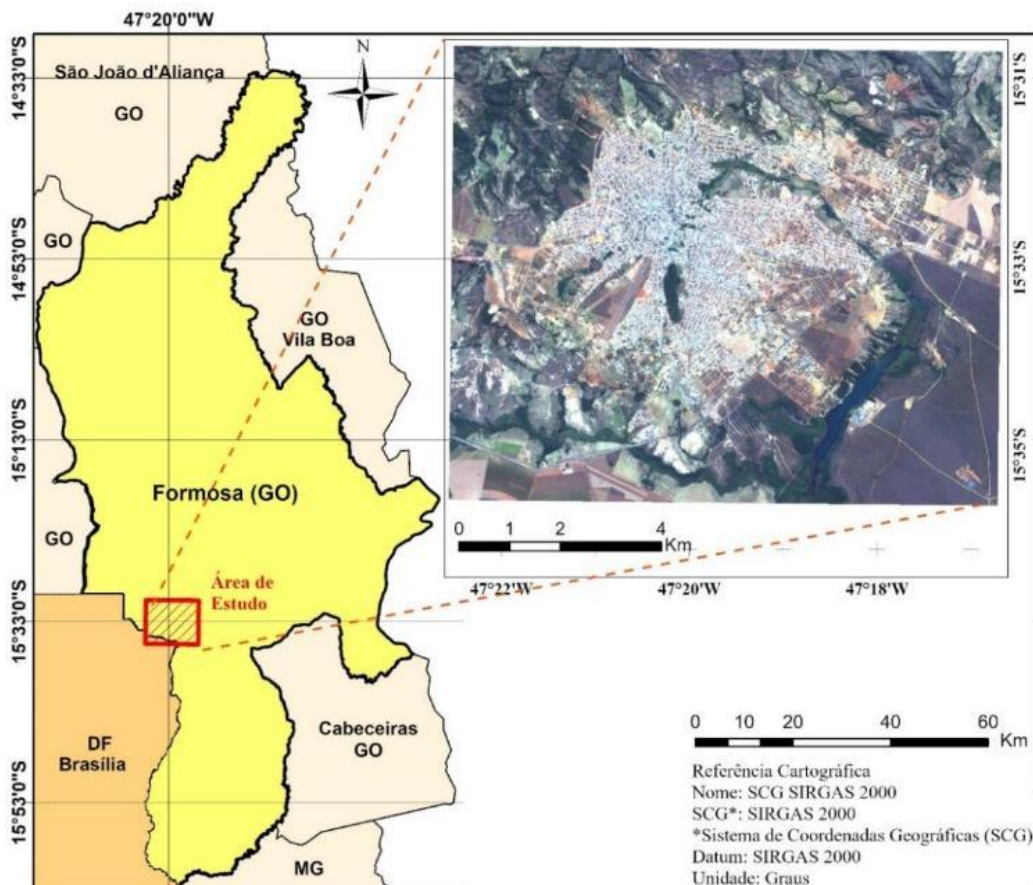
No diagnóstico apresentado no Plano Diretor inicial (INTERPLAN, 2003), observa-se que a distribuição espacial da população de Formosa é mais densa no setor central da cidade e mais esparsa e policêntrica nas regiões periféricas. Além disso, nesse diagnóstico, foram identificadas ocupações irregulares, com sobreposição de titularidades e de ocupação de áreas de preservação e de risco ambiental.

Materiais e Métodos

Área de Estudo

A área de estudo escolhida abrange a região de maior densidade urbana do município de Formosa, no estado de Goiás, conforme representado na Figura 1. Esta área está localizada a 79 km de Brasília, delimitada pelas coordenadas geográficas de latitude sul de 15°30' e 15°35' e longitude oeste de 47°16' e 47.

Figura 1: Mapa de Localização da área de estudo (Imagem RapidEye 2013).



Os materiais selecionados para a pesquisa são imagens multiespectrais de sensoriamento remoto (ver na Tabela 1) e Modelo Digital de Terreno obtido da missão SRTM/NASA, com respectivas datas, resoluções espaciais e fontes.

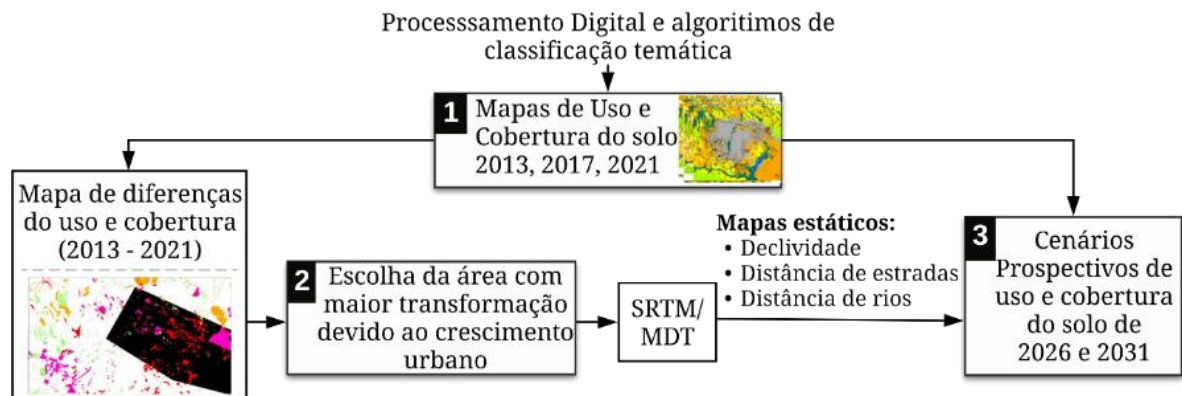
Tabela 1: Materiais utilizados, imagens multiespectrais de sensores remotos e dados de Modelos Digitais de Terreno (DTM).

Sensor Remoto	Data	Resolução Espacial	Fonte
RapidEye	19/07/2013	5 metros	Ministério do Meio Ambiente (MMA)
IKONOS/ QUICK BIRD	09/10/2013 12/09/2017	1 metro	Google Earth Pro.
SENTINEL	12/09/2017	10 metros	INPE
CBERS	21/09/2021	2 metros (Pan) 8 metros (Multi)	INPE
SRTM/DTM	17/10/2011	30 metros	INPE

Adicionalmente, foram utilizados mapas de rede de drenagem e de estradas em escala cartográfica de 1/5.000, obtidos pelo processamento das imagens digitais de sensoriamento remoto orbitais citadas neste artigo. As imagens foram analisadas utilizando algoritmos de processamento de imagens e geoprocessamento disponíveis no sistema de informações geográficas como o Spring 5.3, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), o ArcGIS/ERDAS versão trial 10.3.1, e o Dinamica EGO 3.0.11 como plataforma de simulação ambiental, desenvolvido pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG).

Todas as imagens de sensores remotos foram selecionadas sem cobertura de nuvens e abrangendo períodos de seca para não haver diferenças de umidade de solo que poderiam alterar suas respectivas respostas espectrais. As bandas espectrais dos sensores remotos orbitais abrangem, de um modo geral, os comprimentos de onda das regiões do verde, vermelho e infravermelho próximo, e as bandas pancromáticas foram utilizadas no processo de fusão de imagens com suas respectivas bandas espectrais para um aumento da resolução espacial resultante. O fluxograma metodológico é apresentado na Figura 2.

Figura 2: Passos metodológicos para obtenção dos cenários prospectivos do uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031.

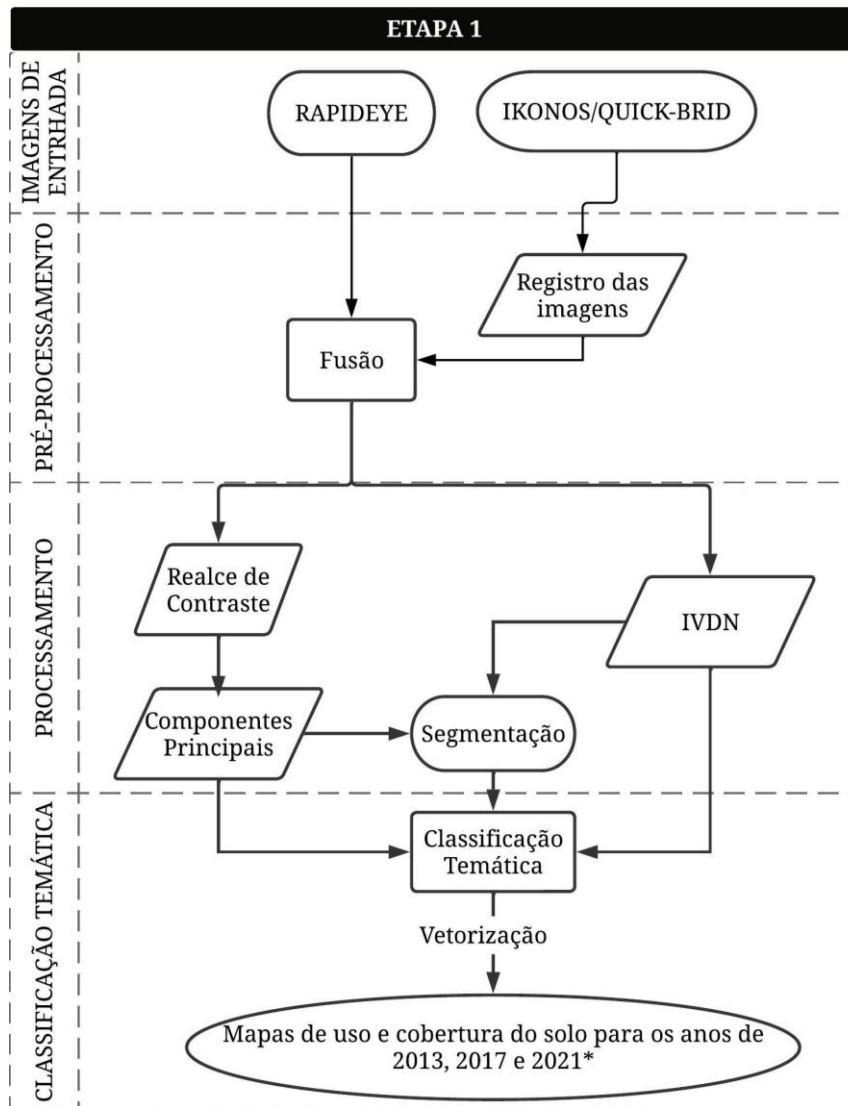


Na primeira fase, para a área de estudo são elaborados os mapas cartográficos que representem o uso e cobertura do solo para os anos de 2013, 2017 e 2021, identificando e mensurando as principais alterações sofridas ao longo desses anos. Em seguida, utilizando o mapa de uso e cobertura do solo do ano de 2021 e com os mapas complementares apresentados na secção 3, a partir da área de maior degradação ambiental no uso e cobertura do solo daquele ano, é aplicada a modelagem da dinâmica ambiental para geração dos cenários prospectivos, em termos de mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031, respectivamente. A seguir, são detalhados os passos metodológicos apresentados na Figura 2.

1. Mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2013, 2017 e 2021

Os mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2013, 2017 e 2021, foram gerados nos sistemas Spring/INPE e ArcGIS/Erda utilizando imagens dos sensores remotos orbitais RapidEye e IKONOS/QUICKBIRD conforme metodologia desenvolvida por Almeida *et al.* (2017), cujos princípios dos algoritmos utilizados no processamento das imagens de sensores remotos orbitais para produção desses mapas são relatados em Schowengerdt (2006), vide Figura 3.

Figura 3: Passos metodológicos usados na produção dos mapas de uso e cobertura do solo.



*As classificações obtidas no mapa de uso e cobertura do solo de 2021 foram verificadas mediante visita de campo que ocorreu no final do mesmo ano.

Fonte: Adaptado Almeida *et al.* (2017).

A Figura 3 ilustra a sequência metodológica adotada, que consiste em: (1) Registro de imagens, georreferenciamento no sistema de coordenadas geográficas GAUSS/UTM Datum WGS 84; (2) Fusão de imagens, bandas multiespectrais do satélite RapidEye com imagens pancromáticas do satélite IKONOS/QUICKBIRD para os anos de 2013, 2017 e 2021 submetidas ao processo de fusão por meio da transformação RGB-IHS-RGB para obter imagens com resolução espacial de um metro; (3) Análise de Componentes Principais (PC), em que as imagens obtidas utilizam as três primeiras bandas espectrais da análise de componentes

principais, uma vez que preservam mais de 85% da informação espectral das bandas espectrais analisadas; (4) Imagem do Índice de Vegetação Normalizado (NDVI), a diferença relativa entre as bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo do satélite RapidEye é utilizada para melhorar a segmentação da imagem com melhor separação das respostas espectrais entre solo e vegetação; (5) classificação temática das imagens PC e NDVI utilizando o classificador “MaxVer”, que categoriza as imagens de acordo com os tipos de classes temáticas selecionadas de uso e cobertura do solo, a saber: savana, mata ciliar, corpo d'água, solo exposto, agricultura, áreas urbanas e áreas de pastagem e, por fim; (6) conversão *raster* para vetor que envolve a rotulação de cada classe temática com seu respectivo polígono, produzindo os mapas temáticos de uso e cobertura do solo para os anos de 2013, 2017 e 2021 na escala cartográfica de 1/25.000. No ano de 2021, durante o trabalho de campo, utilizando visitas aos locais mapeados e imagens com drone, foi feita a validação das classes temáticas de uso e cobertura do solo.

É importante ressaltar que há algumas limitações na metodologia aplicada, o uso da fusão para obter imagens com 1 (um) metro de resolução, tem por ponto positivo aumentar a resolução dos mapas finais, porém tem por limitação distorcer informações espectrais originais dos satélites. Essa limitação fez com que fosse necessário refinar os mapas de uso e cobertura após a classificação. Portanto, a validação para os anos de 2013 e 2017 se deu por fotointerpretação exaustiva de imagens de alta resolução, enquanto em 2021 foi possível complementar a validação mediante visita de campo. Apesar de exaustivo, foi um passo importante para assegurar a consistência da análise multiespectral.

2. Dinâmica Ambiental - Cenários Prospetivos: Mapa de Uso e Cobertura do Solo para os anos de 2026 e 2031

A modelagem da dinâmica ambiental por Autômatos Celulares (AC) foi aplicada à área de maior transformação antrópica em 2021. Para alimentar o modelo e gerar cenários futuros de uso e cobertura do solo (2026 e 2031), foram elaborados mapas de variáveis explicativas, incluindo mapas de declividade, de distâncias às estradas e à rede hidrográfica. O mapa de declividade foi derivado do Modelo Digital de Terreno (MDT) obtido da missão SRTM (INPE, 2011), enquanto os mapas de distância foram calculados a partir de bases vetoriais. Todo o processamento foi executado no *software* ArcGIS, seguindo os procedimentos de Almeida *et al.* (2017).

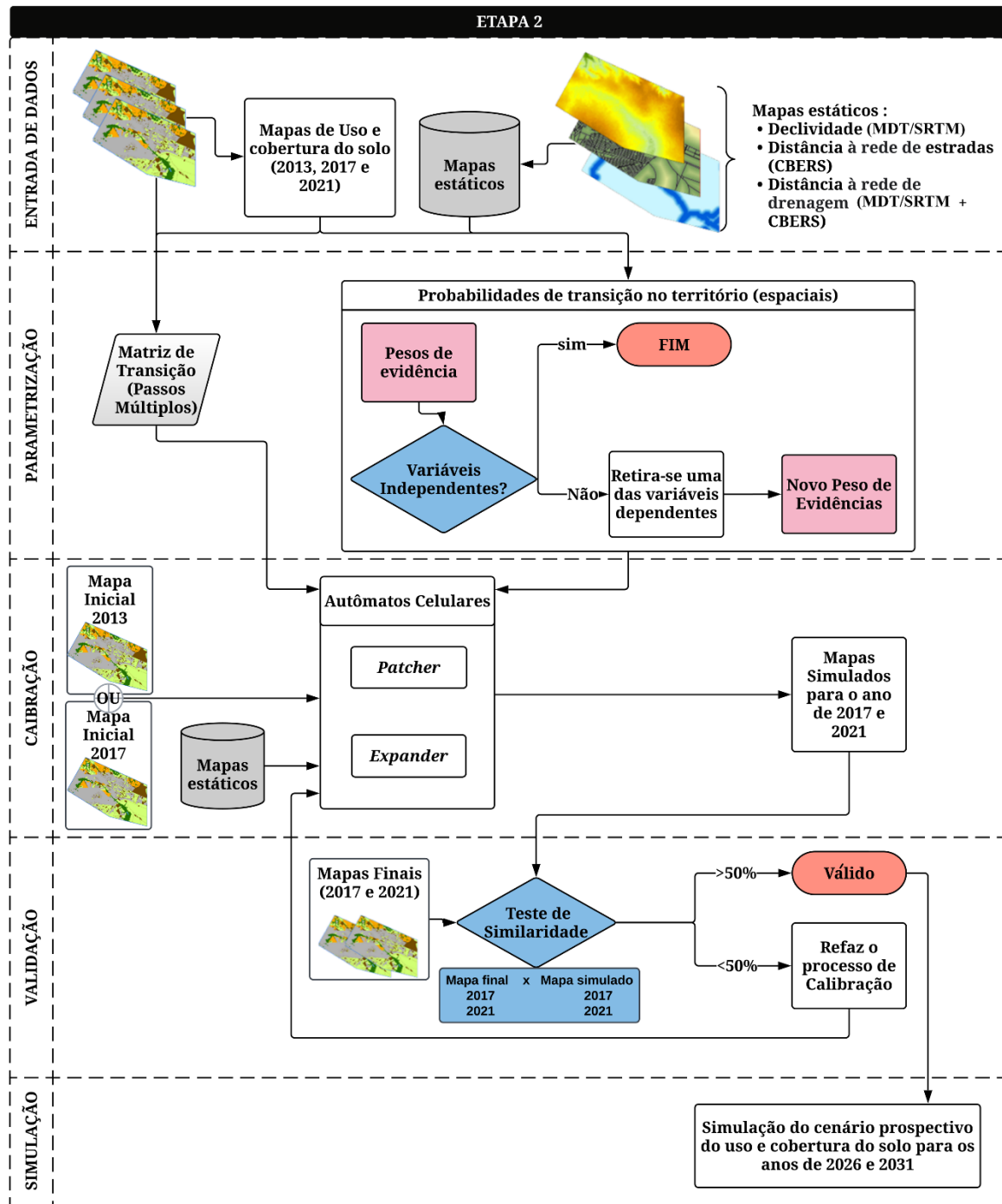
O fluxograma de tarefas para a produção do MDT a partir dos dados do SRTM é resumido nas seguintes etapas: a) Corte e seleção dos dados SRTM da região que abranja a área de maior transformação do uso e cobertura do solo no ano de 2021; b) Geração do modelo digital de terreno (MDT) pelo método TIN (*Triangular Irregular Networks*); com 15 metros de resolução espacial; c) Produção dos mapas intermediários de declividade do terreno, de distâncias de estradas e distâncias da rede de drenagem, utilizando os algoritmos de análise espacial no cálculo de distâncias.

Para obter a dinâmica ambiental da região de maior degradação ambiental na área de estudo, conforme representado no mapa de diferenças de uso e cobertura do solo entre 2013 e 2021, foram utilizados os algoritmos do sistema Dinamica EGO. Este processo foi realizado em quatro etapas distintas: parametrização, calibração, simulação e validação, conforme especificado em Soares-Filho *et al.* (2001) e apresentado na Figura 4.

A primeira fase é chamada de fase de parametrização, em que os pesos das variáveis de entrada são obtidos por meio do procedimento de geração da matriz de transição e do cálculo dos pesos de evidência. A matriz de transição representa a evolução da distribuição de diferentes tipos de uso e cobertura do solo entre os anos inicial (2013) e final (2021). Os pesos de evidência são obtidos a partir das probabilidades condicionais de acordo com Soares-Filho *et al.* (2001), que descrevem que cada uso e cobertura do solo utiliza a classe temática para manter a probabilidade nos mapas de entrada restantes. Em seguida, o Coeficiente de Contingência de Cramer (V) e a Incerteza de Informação Conjunta (U) são calculados para estimar a correlação entre as variáveis de entrada, cujo limite superior aceito para esses Coeficientes é de 0,5, de modo que as variáveis de entrada são consideradas independentes umas das outras. Se ambos os Coeficientes permanecerem abaixo desses limites implica que as variáveis de entrada escolhidas são independentes e, portanto, podem ser usadas para construir o modelo dinâmico ambiental; caso contrário, uma variável dependente é eliminada e reinicia-se a fase de parametrização.

A segunda fase é chamada de fase de calibração e é realizada de acordo com autômatos celulares (AC), conforme Soares-Filho *et al.* (2001) e Soares-Filho *et al.* (2002). Ela é realizada por meio de processos interativos de alteração de parâmetros, comparando o mapa de simulação e o mapa temático de uso e cobertura do solo para 2013.

Figura 4: Etapas para obtenção do cenário prospectivo do uso e cobertura do solo.



Por seu turno, os AC podem ser entendidos como sistemas de matriz de células, em que os processos de mudança são representados célula por célula, com o mapeamento do estado atual de uma célula e seus vizinhos para o estado da célula no instante do tempo e, para isso, utiliza-se as matrizes de transição (ou matriz Markoviana). Essa mudança ocorre em momentos

discretos e os estados que cada célula pode assumir depende de um conjunto específico de regras de transição (Almeida *et al.*, 2017). As regras se baseiam nas cadeias de Markov que se trata de um processo estocástico no qual a saída desse modelo é baseada na probabilidade de mudanças, P_{ij} , entre as classes de uso e cobertura solo (i e j). Portanto, na composição de uma paisagem com dois usos e cobertura do solo, a probabilidade de transição P_{12} seria a probabilidade da classe de uso e cobertura do solo 1 (área com vegetação) no tempo t_0 e sofre mudança para o tipo de uso e cobertura do solo 2 (área urbanizada) no tempo t_1 (Oliveira *et al.*, 2021).

Os parâmetros usados nessa fase são os autômatos celulares chamados *patcher*, que criam novas áreas para classes temáticas, e o *expander*, que expandem as classes temáticas existentes. A fase de calibração é concluída quando se obtém a semelhança superior a 60% entre os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de base escolhidos e o mesmo mapa simulado pelo Dinamica EGO, para a partir daí executar a fase de validação.

A fase de validação foi feita em duas etapas, pela comparação entre os mapas de uso e cobertura do solo dos anos de 2013 a 2017 e as dos anos de 2017 a 2021. Observa-se que no intervalo de tempo entre os anos de 2020-2021 o País sofreu o período da pandemia do COVID, o que influenciou, de certa forma, na ocupação antrópica da área de estudo, e se aplica para se verificar a importância da escolha dos anos de base e o comportamento das matrizes de transição para cenários futuros. Esses dois períodos escolhidos por apresentarem diferentes comportamentos sociais servem também como teste de revalidação e projeção futura para os anos de 2026 e 2031.

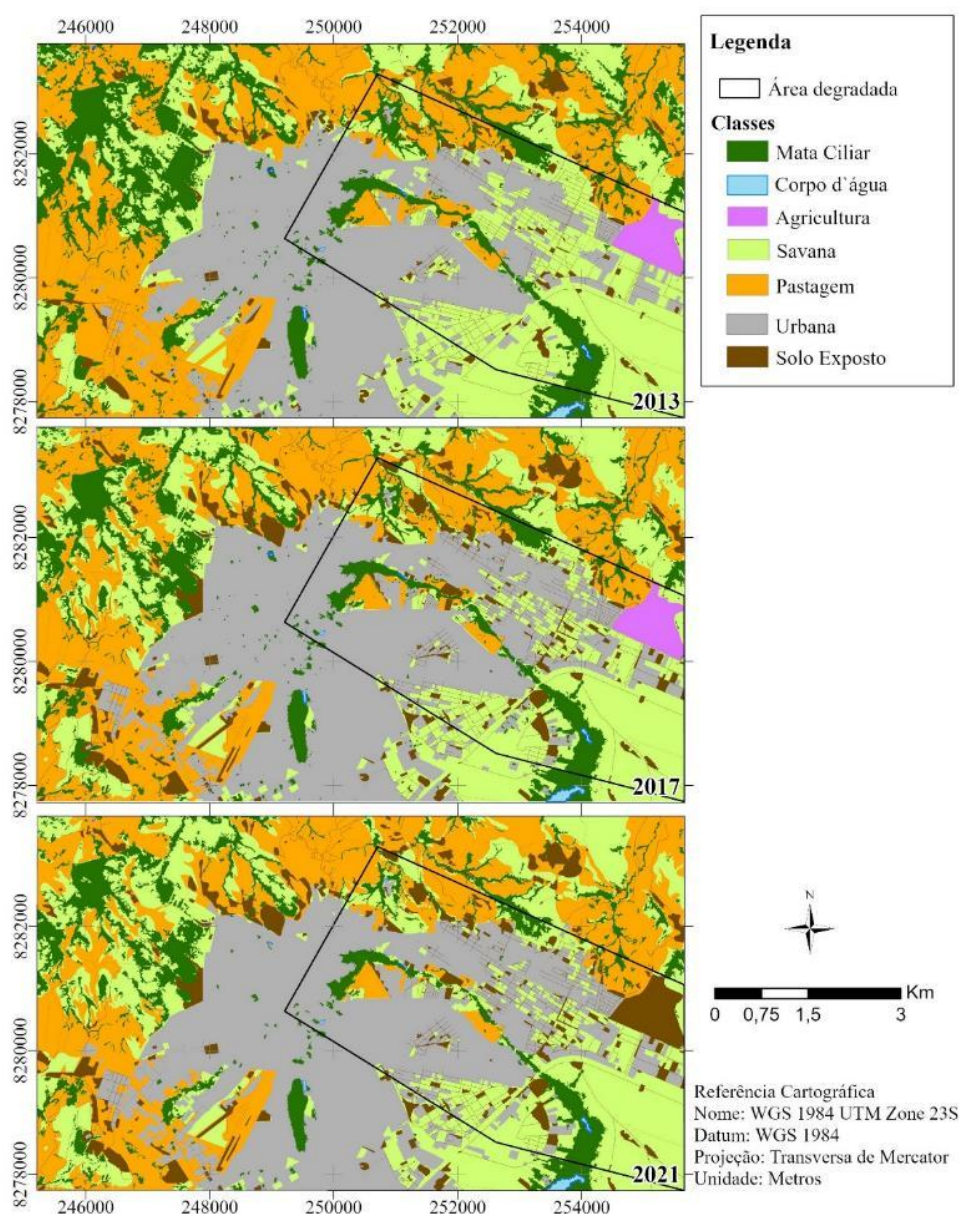
A fase de validação permite que o modelo seja validado por meio de algoritmos baseados na Lógica Fuzzy (Hagen, 2003), utilizando-se o Método de Decaimento Constante fornecido pelo *software* Dinamica EGO. No Método de Decaimento Constante, quando um pixel de mudança não alocado está exatamente no mesmo local do pixel de mudança observado, pois ele é considerado correto quando está nos limites da vizinhança (Soares-Filho *et al.*, 2002). Nessa fase, a dinâmica ambiental é modelada usando dois tipos de autômatos celulares com os seguintes parâmetros: a) *patcher*: com 0,1 e 0,2 hectare (ha) para a área e a variância, respectivamente; e b) *expander*: com 1,0 ha para a área e a variância, e para ambos os tipos foi usado um valor de isometria de 1,5. Finalmente, a fase de simulação é considerada concluída após a validação do modelo e a geração do cenário prospectivo para a área de estudo - os mapas de uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031.

Resultados e Discussões

A variação do uso e cobertura do solo entre os anos de 2013 a 2021

A Figura 5 apresenta os mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo, após a aplicação da metodologia citada no item 4.1 sobre as imagens dos satélites RapidEye, Ikonos/Quick Bird e as imagens orbitais do Google Earth, para os anos de 2013, 2017 e 2021.

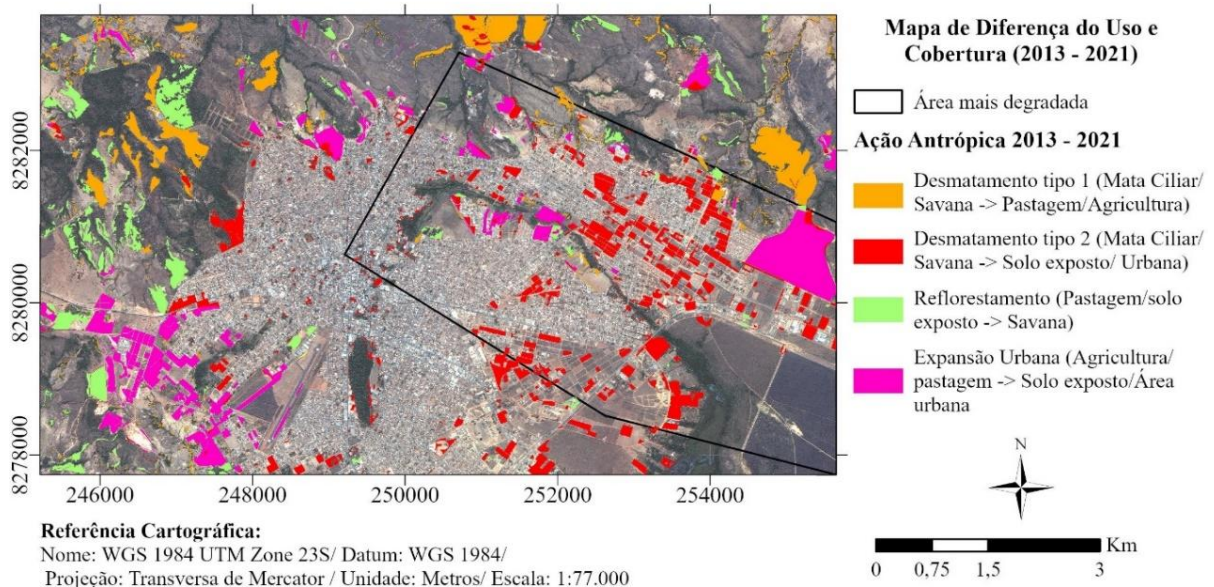
Figura 5: Mapas de uso e cobertura do solo da área de estudo: Anos 2013, 2017 e 2021.



Na Figura 5 tem-se a demarcação de área mais degradada, polígono com linha na cor preta, em que esta região foi demarcada após análise das ações antrópicas mediante o mapa de

diferença dos usos e coberturas do solo entre os anos de 2013 a 2021 (vide Figura 6). Na Tabela 2, por sua vez, foram apresentados os quantitativos em termos de área e de percentual das classes de uso e cobertura do solo em valores de km² entre os anos de 2013 e 2021.

Figura 6: Mapas de diferença do uso e cobertura do solo entre 2013 e 2021



Observa-se na Figura 6 que a maioria das variações de expansão urbana, descritas como desmatamento do tipo 2 (mata ciliar/savana se transformando em solo exposto/área urbana) e expansão urbana (agricultura/pastagem se transformando em solo exposto/área urbana) estão concentradas no retângulo preto delimitado, apesar de terem significativas expansões urbanas na porção sudoeste. Essa área delimitada pelo retângulo preto também abrange parte da região próxima ao Córrego Josefa Gomes e da Lagoa Feia que apresentam restrições legais de ocupação devido à proximidade aos recursos hídricos e à área reservada para exercícios militares do Exército Brasileiro. Esta região será utilizada para elaboração dos cenários prospectivos do uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031.

Na Tabela 2, tomando como base o ano de 2013, as transformações no uso e cobertura do solo até 2021 foram significativas. A mata ciliar apresentou um decréscimo de 16,14% para 11%, devido ao desmatamento da vegetação nativa. Embora as áreas agrícolas não tivessem variação entre os anos de 2013 e 2017, em 2021 essas áreas foram classificadas como solo exposto, possivelmente em um comportamento de expansão urbana que ocorreu durante a pandemia do COVID-19. A área urbana aumentou de 27,74% para 31,71%, enquanto o solo

exposto cresceu de 3,8% para 8,05%, indicando uma pressão do crescimento urbano. As áreas de corpos d'água e savana (campo sujo e campo limpo de cerrado) não apresentaram variações significativas durante o período estudado. Todas essas transformações citadas na Tabela 2 corroboram com os dados censitários do IBGE para o ano de 2022, que apresenta um crescimento antrópico significativo na área de estudo.

Tabela 2: Mapas de uso e cobertura do solo – Variação de áreas entre as classes temáticas nos anos de 2013, 2017 e 2021, em consonância com os dados censitários de 2020 e 2022.

Classe Temática	2013 (Km ²)	2017 (Km ²)	2021 (Km ²)
Mata Ciliar	10,18 16,14%	8,19 12,99%	6,94 11,00%
Corpo d'água	0,10 0,16%	0,10 0,16%	0,11 0,17%
Agricultura	0,75 1,19%	0,75 1,19%	0,00 0,00%
Pastagem	16,21 25,69%	14,89 23,60%	14,83 23,51%
Urbana	17,49 27,74%	19,06 30,22%	20,00 31,71%
Solo Exposto	2,40 3,80%	4,28 6,79%	5,08 8,05%
Savana	15,94 25,28%	15,80 25,05%	16,12 25,56%
Total	63,07	63,07	63,07

Essas transformações apresentadas na Tabela 2 resultam em uma série de possíveis impactos ambientais. A remoção da vegetação ciliar, por exemplo, tende a acentuar os processos erosivos nas margens dos rios, aumentando a vulnerabilidade ao assoreamento dos corpos d'água e comprometimento da qualidade hídrica local. A expansão urbana e a ampliação de solos expostos agravam essa situação, pois a impermeabilização do solo pode resultar em um aumento do escoamento superficial, elevando o risco de inundações, além de promover a formação de microclimas mais quentes, conhecidos como ilhas de calor. Conseqüentemente, o solo exposto se torna mais suscetível à perda de nutrientes e à erosão, o que também pode afetar a degradação geral do solo e dos recursos hídricos.

Cenários Prospectivos: A projeção do uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031

Na área com maior transformação do uso e cobertura do solo, causada por ações antrópicas e indicada na Figura 6, foram produzidos os mapas estáticos de declividade, rede de drenagem e estradas, obtidos a partir do Modelo Digital de Terreno (MDT) e dos mapas vetoriais de estradas e drenagem. Esses mapas de alta resolução espacial compõem os dados da fase de entrada do Dinâmica-EGO.

Na fase de parametrização do Dinâmica-EGO, foi definida a matriz de transição de múltiplos passos, baseada nas transições das classes temáticas dos mapas de uso e cobertura do solo entre os anos de 2013-2017 e 2017-2021. As simulações utilizando o período base dos anos entre 2013-2017 não atingiram os valores mínimos de similaridade das classes temáticas de uso e cobertura do solo, ao contrário dos mapas dos anos de 2017-2021 que foram, portanto, utilizados como mapas de entrada para a simulação dos cenários prospectivos para os anos de 2026 e 2031.

O Quadro 1 apresenta os valores da matriz de transição das classes temáticas de uso e cobertura do solo para o período entre os anos de 2017 e 2021.

Quadro 1: Matriz de transição das classes temáticas de uso e cobertura do solo para as simulações realizadas dos anos de 2017-2021

Matriz de transição de 2017-2021					
Classe	1. Mata Ciliar / Corpo d'água	2. Savana	3. Pastagem/ Agricultura	4. Urbana	5. Solo Exposto
1. Mata Ciliar/ Corpo d'água	-	11,85%	1,92%	3,06%	0,69%
2. Savana	-	-	0,74%	4,23%	0,61%
3. Pastagem/ Agricultura	-	2,93%	-	2,08%	28,35%
4. Urbana	0,03%	0,18%	-	-	-
5. Solo Exposto	-	-	0,11%	-	-

No Quadro 1, observa-se que a área mais degradada apresenta as maiores transições das classes temáticas 3 (pastagem e agricultura) para a classe temática 5 (solo exposto), com uma variação de 28,35%, e da classe temática 1 (mata ciliar/corpo d'água) para a classe temática 2 (savana), com uma variação de 11,85%. Além disso, a transição das classes temáticas 1, 2 e 3 para a classe temática 4 (urbana) ultrapassou 8%. Essas mudanças indicam um significativo processo de degradação ambiental na região analisada, sendo essas variações cruciais para a

compreensão das dinâmicas do uso e cobertura do solo e suas implicações ambientais, o que novamente corrobora com os dados censitários.

A Tabela 3 detalha os parâmetros otimizados dos autômatos celulares (*Patcher* e *Expander*) que nortearam as simulações dos cenários de uso e cobertura do solo para 2026 e 2031, além de apresentar os valores de similaridade calculados pelos métodos de decaimento exponencial e constante.

Tabela 3: Parâmetros otimizados dos Autômatos Celulares (*Patcher* e *Expander*) no processo de calibração e os resultados de similaridade pelo método exponencial e de decaimento constante para as simulações realizadas dos anos de 2017-2021.

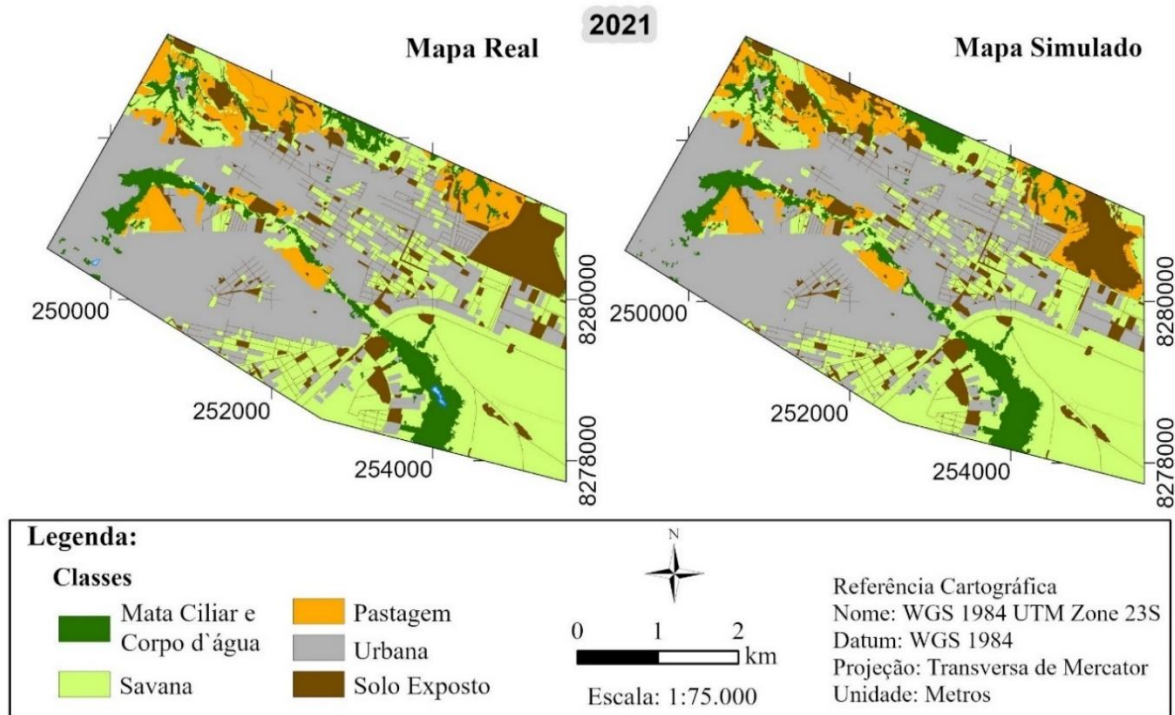
Fase de calibração - Parâmetros otimizados							
Período	Probabilidade <i>Expander</i>	<i>Expander</i>			<i>Patcher</i>		
		Média (ha)	Variância (ha)	Isometria	Média (ha)	Variância (ha)	Isometria
2017 -2021	70%	0,01	0,02	1,0	0,001	0,002	1,0
Fase de validação – índice de similaridade <i>fuzzy</i> dos parâmetros otimizados							
Período	Janela de Análise	Função de Decaimento					
		Constante			Exponencial		
		Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo	
2017-2021	3 x 3	0,52	0,52		0,51	0,60	
	5 x 5	0,55	0,55		0,52	0,63	
	7 x 7	0,58	0,58		0,55	0,64	

Na Tabela 3 são apresentados os valores calibrados dos autômatos celulares, bem como os valores de similaridade obtidos pelo método exponencial e de decaimento constante durante a fase de validação. As similaridades mínimas pelo método de decaimento constante para as janelas 5x5 e 7x7 foram, respectivamente, 0,55 e 0,58. Para a simulação futura, foi utilizada uma janela de 7x7 (matriz de pixels de 7 linhas por 7 colunas) e, de acordo com Soares-Filho *et al.* (2013) os índices de similaridade *fuzzy* precisam ser superiores a 0,5 para que o mapa seja validado. Os valores de similaridade melhoram significativamente quanto menor o número de classes temáticas consideradas. Além disso, a alta resolução espacial faz com que as similaridades aceitáveis sejam obtidas apenas com janelas abrangendo uma quantidade maior de pixels.

Considerando a mesma área de estudo entre os anos de 1999 a 2014, Diniz *et al.* (2017) obtiveram uma similaridade de 0,57 pelo método de decaimento constante, utilizando a resolução espacial do pixel de 30 metros e considerando cinco classes temáticas de uso e cobertura em uma janela de 5x5. Tal fato demonstra que, apesar de os autores terem utilizado

mapas com resolução inferior em uma janela semelhante, os resultados desse artigo apresentaram uma maior similaridade. A comparação visual entre o mapa real e o simulado para o ano de 2021 está apresentada na Figura 7.

Figura 7: Similaridade entre os mapas real e simulado para o ano de 2021 (Fase de validação).

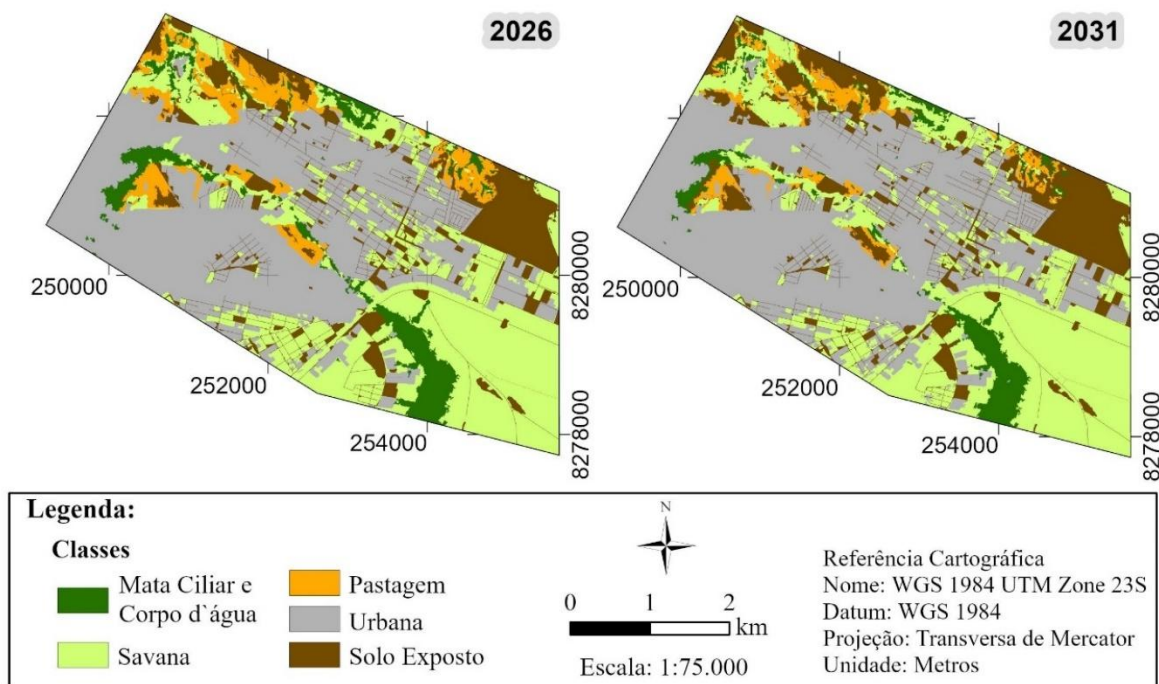


Na Figura 7, observa-se uma similaridade elevada entre o mapa simulado do uso e cobertura do solo para o ano de 2021 e o mapa real do uso e cobertura do solo do mesmo ano obtido com metodologia de processamento da imagem apresentada na Figura 3. Esta semelhança demonstra a capacidade do modelo em representar as dinâmicas de uso e cobertura do solo da região, o que valida o processo de calibração e permite avançar para as próximas etapas da modelagem. Em seguida, após os autômatos celulares estarem calibrados foram produzidos os cenários prospectivos do uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031 apresentados na Figura 8.

Na Figura 8, observa-se uma intensificação da urbanização na porção central, assim como um aumento de solo exposto na região próxima ao Córrego Josefa Gomes, tributário que alimenta a Lagoa Feia. Esse processo de supressão da vegetação nativa é preocupante, principalmente por se tratar de uma área legalmente protegida, com distância inferior a 30

metros da rede de drenagem. Conforme explicitado por Lara *et al.* (2017), esta região foi classificada como inapta para expansão urbana, dado que tal processo pode acarretar aumento do assoreamento dos recursos hídricos, bem como inundações durante o período de cheias nas habitações próximas.

Figura 8: Cenários Prospectivos do uso e cobertura do solo para os anos de 2026 e 2031.

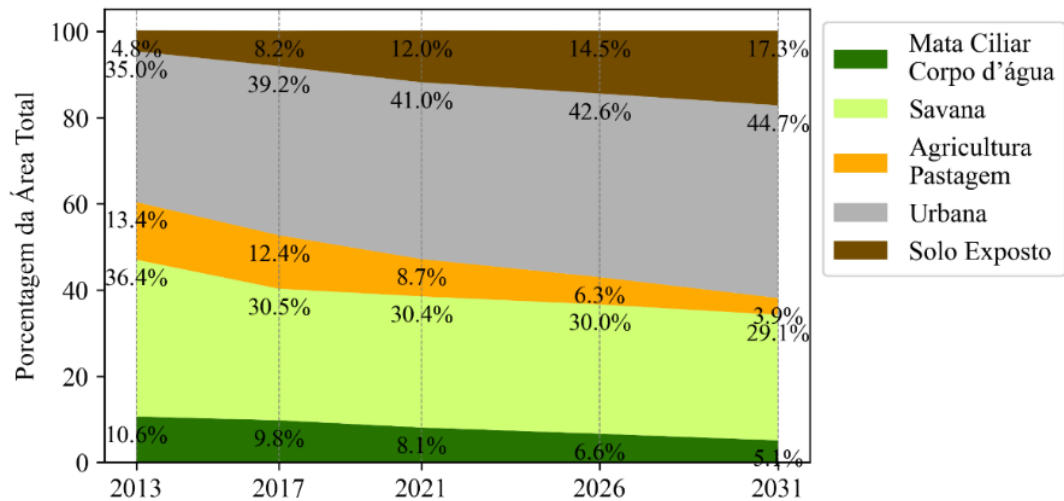


Com base nas classes temáticas dos cenários prospectivos, pode-se fazer uma mensuração de cada classe em termos de área ocupada e em porcentagem de ocupação em relação à área total degradada, para os anos de 2013 a 2031, conforme apresentado na Figura 9. Na qual, é possível observar que a classe temática Mata Ciliar demonstrou uma significativa variação em sua área entre os anos de 2013 e 2031. O cenário prospectivo do tipo tendencial-inercial apresenta uma perda de 1,15 km² da vegetação nativa que acompanha as redes de drenagem, atribuída às ações de desmatamento da vegetação nativa. As causas prováveis incluem processos de loteamento e de grilagem da terra.

Na Figura 9, é possível observar que a classe temática Mata Ciliar demonstrou uma significativa variação em sua área entre os anos de 2013 e 2031. O cenário prospectivo do tipo tendencial-inercial apresenta uma perda de 1,15 km² da vegetação nativa que acompanha as

redes de drenagem, atribuída às ações de desmatamento da vegetação nativa. As causas prováveis incluem processos de loteamento e de grilagem da terra.

Figura 9: Variação das classes temáticas de uso e cobertura do solo, entre os anos de 2013 e 2031.



Ano	Mata Ciliar Corpo d'água	Savana	Agricultura	Urbana	Solo Exposto
2013	2,21 km ²	7,57 km ²	2,78 km ²	7,28 km ²	1,00 km ²
2017	2,03 km ²	6,35 km ²	2,58 km ²	8,16 km ²	1,70 km ²
2021	1,68 km ²	6,33 km ²	1,80 km ²	8,53 km ²	2,49 km ²
2026	1,38 km ²	6,24 km ²	1,32 km ²	8,86 km ²	3,02 km ²
2031	1,06 km ²	6,06 km ²	0,81 km ²	9,30 km ²	3,59 km ²

A classe temática Savana, representando uma vegetação de Cerrado tipo campo sujo, também apresentou perdas significativas. A análise das imagens de satélite e visitas no campo da área de estudo indicam a presença de tanques de dessedentação de animais nessa área, sugerindo seu uso como pastagem. O cenário prospectivo do tipo tendencial-inercial apresenta uma perda total de 1,51 km² nesta classe temática.

A classe temática Agricultura no cenário prospectivo do tipo tendencial-inercial apresenta uma perda acentuada com decréscimo de área ao longo dos anos. Em 2013, a agricultura ocupava 13,4% da área selecionada, percentual que caiu para 8,7% em 2021, durante a pandemia de COVID-19. A projeção para o ano de 2031 é significativa, prevendo que a agricultura ocupará apenas 3,38% da área. Esta tendência indica a possível perda da vocação agrícola do município de Formosa, com a conversão de áreas agrícolas em loteamentos e grilagens de terra.

As classes temáticas Urbana e Solo Exposto apresentaram crescimento entre os anos de 2013 e 2021, bem como nos cenários prospectivos obtidos pelo Dinamica para anos de 2026 a 2031. Conforme os dados do Censo do IBGE de 2022 ocorreu um aumento significativo da população urbana. Este crescimento contínuo está associado à perda da vegetação nativa, resultando em maior compactação do solo e aumento do escoamento superficial das águas da chuva. Essas mudanças acarretam riscos elevados de enchentes, de deslizamentos de terra, de processos erosivos e de assoreamento.

Ressalta-se que os cenários prospectivos obtidos pelo Dinamica EGO, mesmo utilizando algoritmos baseados em Inteligência Artificial, como os AC e os da cadeia de Markov, são cenários do tipo tendencial-inercial no seu modelamento da dinâmica ambiental do uso e cobertura do solo e que, como qualquer modelo, é sempre uma tentativa de representação da realidade. O cenário do tipo tendencial-inercial, em si, não considera a implantação de possíveis ações de mitigação de impactos ambientais ou de políticas públicas que compreenderiam a ocupação ordenada do território da área de estudo, mudariam significativamente os resultados obtidos dos cenários prospectivos para os anos de 2026 e 2031 do uso e cobertura do solo.

Conclusão e Considerações Finais

- A metodologia aplicada para obtenção dos cenários prospectivos do tipo tendencial-inercial de uso e cobertura do solo, utilizando autômatos celulares baseados em cadeias de Markov do *software* Dinamica EGO, mostrou-se eficaz ao apresentar a evolução e a tendência de transformação do território da área de estudo causadas pelo aumento da pressão antrópica. Sugere-se, para futuras pesquisas, o emprego de redes neurais profundas como metodologia de Inteligência Artificial com aprendizado de máquina nos autômatos celulares para a realização dos cenários prospectivos.
- As projeções do tipo cenários prospectivos do tipo tendencial-inercial do uso e cobertura do solo produzidas pelo Dinamica EGO corroboraram com as tendências apontadas pelo Censo do IBGE, evidenciando o aumento da pressão antrópica sobre o território, com desmatamento acentuado da vegetação nativa e a mudança econômica apontada pelo Censo, devido à diminuição das práticas agrícolas em prol de áreas de loteamento e/ou grilagem de terra. Essa ocupação é particularmente preocupante por ocorrer em áreas inaptas, como regiões a menos de trinta metros do córrego principal da área estudada.

- O crescimento antrópico estimado para o ano de 2031, considerando as alterações no uso e cobertura do solo causará, se não houver a implantação de possíveis ações de mitigação de impactos ambientais ou de políticas públicas que compreenderiam a ocupação ordenada do território, impactos ambientais negativos profundos. Entre os impactos previstos estão aumento dos processos erosivos laminares e lineares, aumento no assoreamento dos recursos hídricos, aumento da compactação do solo, aumento do escoamento superficial e das áreas de inundação, comprometimento de encostas e taludes devido à ocupação urbana irregular e diminuição de boas práticas conservacionistas e de manejo do solo. Impactos dessa ordem afetam direta e negativamente a vulnerabilidade ambiental e muitas vezes não são previstos no Plano Diretor Municipal.
- Portanto, a metodologia utilizada neste artigo para a produção de cenários prospectivos do tipo tendencial-inercial do tipo de mapas futuros de uso e cobertura do solo da área de estudo no município de Formosa (GO) para os anos de 2026 e 2031, por meio da modelagem da dinâmica ambiental utilizando autômatos celulares pode servir de base para políticas públicas que promovam o uso racional do espaço urbano e pode ser replicada em qualquer área do território nacional. Acrescenta-se a essa possibilidade o desenvolvimento dos algoritmos de autômatos celulares que podem, futuramente, ser incrementados por redes neurais e processos de aprendizado de máquina da Inteligência Artificial, aumentando ainda mais a sua capacidade de elaborar cenários prospectivos do uso e cobertura do solo de um determinado território.
- Como consideração final, os autores ressaltam a originalidade da contribuição do uso da metodologia deste artigo na produção de cenários prospectivos do tipo tendencial-inercial, na produção de mapas futuros de uso e cobertura do solo, para a área de geotecnologias aplicadas ao planejamento urbano em geral. Ao possibilitar a criação de mapas futuros de uso e cobertura do solo, que servem como fundamento para a atualização dos Planos Diretores Municipais e para a formulação de políticas públicas mais eficazes, este estudo estabelece um precedente significativo para a utilização da modelagem da dinâmica ambiental como uma ferramenta fundamental na promoção de um uso racional e ordenado do espaço urbano.

Referências Bibliográficas

- Albuquerque, C. C. de, Brasil, M. C. O., Mateus, N. P. A., Macedo, D. R., & Ribeiro, S. M. C. (2024). Estimativa do Número da Curva (CN) e sua adaptação ao contexto das Paisagens Mineiras. *Labor e Engenharia*, 18, e024002. <https://doi.org/10.20396/labore.v18i00.8673566>
- Almeida, W. S., Diniz, M. S., Silva, L. S., Júnior, E. E. A. S., Souza, N. M., Farias, R. de J. C., & Camapum de Carvalho, J. (2017). Vulnerabilidade e modelagem ambiental em bacias hidrográficas. In M. M. Sales, J. Camapum de Carvalho, M. M. dos A. Mascarenha, M. P. Luz, N. M. Souza, & R. R. Angelim (Eds.), *Erosão em borda de reservatório* (pp. 287–321). Gráfica UFG.
- Basse, R. M., Omrani, H., Charif, O., Gerber, P., & Bódis, K. (2014). Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale. *Applied Geography*, 53, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.016>
- Cao, Y., Zhang, X., Fu, Y., Lu, Z., & Shen, X. (2020). Urban spatial growth modeling using logistic regression and cellular automata: A case study of Hangzhou. *Ecological Indicators*, 113(December 2019), 106200. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106200>
- Chakraborty, A., Sikder, S., Omrani, H., & Teller, J. (2022). Cellular Automata in Modeling and Predicting Urban Densification: Revisiting the Literature since 1971. *Land*, 11(7). <https://doi.org/10.3390/land11071113>
- Companhia de Planejamento do Distrito Federal - Codeplan. (2014). *Pesquisa Metropolitana por Amostra de Domicílios -PMAD - 2013*.
- Diniz, M. dos S., Almeida, W. S. de, & Salazar, J. P. C. (2017). Modelagem espacial de uso e ocupação do solo estabelecida mediante análise da vulnerabilidade ambiental. *Anais Do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBRS)*, 1–23.
- Dioşan, L., Andreica, A., & Enescu, A. (2017). The Use of Simple Cellular Automata in Image Processing. *Studia Universitatis Babeş-Bolyai Informatica*, 62(1), 5–14. <https://doi.org/10.24193/subbi.2017.1.01>
- Ghilardi, A., Bailis, R., Mas, J. F., Skutsch, M., Elvir, J. A., Quevedo, A., Masera, O., Dwivedi, P., Drigo, R., & Vega, E. (2016). Spatiotemporal modeling of fuelwood environmental impacts: Towards improved accounting for non-renewable biomass. *Environmental Modelling and Software*, 82, 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.04.023>

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2023). *Censo Demográfico 2022: população e domicílios - primeiros resultados*.
<https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102011.pdf>
- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). (2011). Dados SRTM do projeto TOPODATA. Disponível em <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acessado em abril de 2023.
- INTERPLAN. (2003). *Plano Diretor do Município de Formosa/GO: Relatório Final consolidado*, Formosa, Brasil, 188p. Disponível em https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosSNPU/RedeAvaliacao/Formosa_Planos_DiretorDFeGO.pdf. Acessado em em agosto de 2024.
- Lara, H. G. de A., Araujo, D. L. de, & Almeida, W. S. (2017). Inserção do planejamento ambiental na avaliação de áreas para ocupação urbana no município de Formosa - GO. *Anais Do XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBRS)*, 8.
- Oliveira, L. M. de, Silva, S. M. O. da, Assis de Souza Filho, F. de, Rufino, I. A. A., Brito, H. C. de, & Melo Lopes, T. M. X. de. (2021). Modelagem dinâmica da expansão urbana usando autômatos celulares: o caso de Fortaleza–CE. *Urbe: Revista Brasileira de Gestão Urbana*, 13, 1–14. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.E20200092>
- Prefeitura Municipal de Formosa. (2004). *Lei Municipal nº 251, de 20 de dezembro de 2004. Dispõe sobre a instituição do Plano Diretor e dá outras providências*. Disponível em <http://www.sapl.formosa.go.leg.br>. Acessado em agosto de 2024.
- Prefeitura Municipal de Formosa. (2022). *Lei Complementar nº 42, de 28 de dezembro de 2022. Revoga a Lei Ordinária nº 251 e institui o Plano Diretor de Desenvolvimento Integrado*. Disponível em <http://www.sapl.formosa.go.leg.br>. Acessado em em agosto de 2024.
- Ramos-Bernal, R., Vázquez-Jiménez, R., & Rojas, W. R. (2024). Landslide potential mapping applying maximum entropy to continuous change maps. *Applied Geomatics*, 951–971. <https://doi.org/10.1007/s12518-024-00596-1>
- Rossetti, L. A. F. G., Dos Anjos F. Pinto, S., & De Almeida, C. M. (2013). Cellular automata-based spatial dynamic modeling for analyzing urban land use change. *Joint Urban Remote Sensing Event 2013, JURSE 2013, 1988*, 288–291. <https://doi.org/10.1109/JURSE.2013.6550721>
- Salazar, J. P. C. (2015). *Determinação de cenários futuros de uso e cobertura do solo e sua influência na vulnerabilidade ambiental: o caso do Município de Formosa–Goiás*.

Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. DM – 175/2015, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental Universidade de Brasília, Brasília, DF, 112 p.

Schowengerdt, R. A. (2006). Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. In *Springer Tracts in Modern Physics* (3rd ed.). Academic Press.

Soares-Filho, B., Rodrigues, H., & Follador, M. (2013). A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. *Environmental Modelling and Software*, 43(March 2019), 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.01.010>

Wang, J., Bretz, M., Dewan, M. A. A., & Delavar, M. A. (2022). Machine learning in modelling land-use and land cover-change (LULCC): Current status, challenges and prospects. *Science of the Total Environment*, 822, 153559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153559>

Yadav, P. K., Mishra, V. N., Kumari, M., Kumar, A., Kumar, P., & Bhatla, R. (2024). Spatially explicit simulation and forecasting of urban growth using weights of evidence based cellular automata model in a millennium city of India. *Physics and Chemistry of the Earth*, 136(May), 103739. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103739>

Zhang, Y., & Bölskei, H. (2024). *Cellular automata, many-valued logic, and deep neural networks*. 1–42. <http://arxiv.org/abs/2404.05259>

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Wagner Santos de Almeida: conceituação, análise dos resultados, escrita, edição e revisão do rascunho original, coordenação e orientação do projeto de pesquisa. Mariana dos Santos Diniz: conceituação, metodologia, obtenção e processamento dos dados, validação e análise dos resultados, graficação e escrita do rascunho original. Juan Pablo Catamusca Salazar: metodologia, domínio do *software* DINAMICA EGO e validação dos resultados. Declaramos ainda ciência das Diretrizes Gerais da Geoambiente On-line.

Financiamento: Agradecemos à Universidade de Brasília pelo ambiente de aprendizado, assim como aos órgãos de fomento CAPES, CNPq e FAP-DF pelo suporte financeiro.

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.