Modelagem da Expansão Urbana como Instrumento de Apoio ao Cadastro Territorial Multifinalitário: Estudo de Caso no Município de Ponte Nova – MG

Urban Expansion Modeling as a Support Tool for Multipurpose Land Registry: Case Study in the Municipality of Ponte Nova – MG

Pedro Henrique Moreira Rigueira[1]

Matheus Augusto Felix da Silva[2]

Miqueias dos Santos Rocha[3]

Daniel Camilo de Oliveira Duarte[4]

André Luiz Lopes de Faria[5]

RESUMO: O crescimento urbano acelerado e as transformações no uso do solo exigem instrumentos eficazes de gestão territorial. Este trabalho apresenta a estruturação da base de dados geoespaciais do pré-projeto cadastral do município de Ponte Nova (MG), integrando análise morfométrica e simulação preditiva para subsidiar a implementação do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) conforme as diretrizes da Portaria MDR nº 3.242/2022. A partir de séries históricas do MapBiomas (1990, 2020 e 2024) reclassificadas em seis categorias temáticas, aplicou-se o módulo Land Change Modeler (LCM) com Redes Neurais Artificiais do tipo Multilayer Perceptron (MLP) e Cadeias de Markov para projetar cenários de ocupação urbana até o ano de 2050. O modelo foi validado pelo confronto do cenário simulado de 2024 com os dados reais de referência, alcançando um índice Kappa de 98,08%. A análise retrospectiva (1990 a 2020) apontou expansão urbana de 506 ha, associada ao recuo da agricultura e à regeneração de formações florestais. Para o período de 2024 a 2050, projeta-se um acréscimo urbano de 388 ha sobre áreas agrícolas, identificando o distrito de Rosário do Pontal como expressivo vetor secundário de crescimento em razão de condicionantes topográficos favoráveis. Os resultados comprovam a viabilidade das geotecnologias preditivas na antecipação de dinâmicas territoriais, oferecendo diretrizes técnicas indispensáveis para o ordenamento urbano preventivo, a contenção de riscos em áreas declivosas e a promoção da justiça territorial.

Palavras-chave: Cadastro Territorial Multifinalitário; Expansão Urbana; Redes Neurais Artificiais; Land Change Modeler; Modelagem.

ABSTRACT: Accelerated urban growth and land use transformations require effective territorial management tools. This paper presents the structuring of the geospatial database for the multipurpose cadastral pre-project of Ponte Nova, Minas Gerais State, Brazil. The methodology integrates morphometric analysis and predictive simulation to support the implementation of the Multipurpose Land Registry (CTM) in accordance with national guidelines (MDR Ordinance No. 3,242/2022). Based on MapBiomas historical series (1990, 2020, and 2024) reclassified into six thematic categories, the Land Change Modeler (LCM) module with Multilayer Perceptron (MLP) Artificial Neural Networks and Markov Chains was applied to project urban growth scenarios up to 2050. The model was validated by comparing the simulated 2024 scenario with real reference data, achieving a Kappa index of 98.08%. Retrospective analysis (1990-2020) revealed an urban expansion of 506 ha, related to agricultural decline and forest regeneration. For the 2024-2050 period, a projected urban increase of 388 ha over agricultural land is predicted, identifying the district of Rosário do Pontal as an important secondary growth vector due to favorable topographic conditions. Results demonstrate the feasibility of predictive geotechnologies in anticipating territorial dynamics, providing indispensable technical guidelines for preventive urban planning, hazard mitigation in steep terrain, and the promotion of territorial justice.

Keywords: Multipurpose Land Registry; Urban Expansion; Artificial Neural Networks; Land Change Modeler; Modeling.

[1] Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Geografia / pedro.h.rigueira@ufv.br
[2] Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Civil / matheus.felix@ufv.br
[3] Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Civil / miqueias.rocha@ufv.br
[4] Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Engenharia Civil / daniel.duarte@ufv.br
[5] Universidade Federal de Viçosa - Departamento de Geografia / andre@ufv.br

1 INTRODUÇÃO

A acelerada expansão urbana e as contínuas transformações no uso e na cobertura do solo representam um dos principais desafios para a sustentabilidade e o ordenamento do território (LAMBIN et al., 2001; BATTY, 2008). Em cidades de médio e pequeno porte, o crescimento sobre áreas rurais e de fragilidade ambiental demanda instrumentos de gestão capazes de associar o conhecimento físico do terreno à dinamização das políticas públicas (OJIMA, 2007). Nesse contexto, o Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) consolida-se como um pilar essencial para o planejamento e a gestão territorial, sendo conceituado como um sistema de informações espaciais fundado na parcela imobiliária, projetado para orientar e fundamentar a tomada de decisões nos âmbitos público e privado (ERBA, 2008; LOCH; ERBA, 2007). Conforme estabelecido pelas Diretrizes Nacionais aprovadas pela Portaria MDR nº 3.242/2022 (BRASIL, 2022), que revogou a antiga Portaria nº 511/2009, o CTM articula o cadastro territorial, entendido como a base geométrica oficial e sistemática das parcelas, aos diversos cadastros temáticos socioambientais, de infraestrutura e tributários. Essa integração fornece dados georreferenciados padronizados para atender a finalidades fiscais (avaliação imobiliária e cobrança justa do IPTU), jurídicas (regularização fundiária), administrativas, urbanísticas e ambientais.

No município de Ponte Nova, situado na Zona da Mata mineira, a aproximadamente 180 km de Belo Horizonte, o processo de expansão espacial enfrenta condicionantes físico-naturais marcantes. Possuindo uma extensão territorial de cerca de 471 km² e uma população de 57.776 habitantes no Censo de 2022 (com estimativa de 59.638 habitantes para 2025), o município está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Piranga, principal formador do Rio Doce, e sob domínio do clima Tropical de Altitude. O relevo local é predominantemente declivoso, apresentando 55,45% do seu território classificado como forte ondulado e apenas 4,03% como plano. Essa conformação geomorfológica impõe severas restrições técnicas e legais ao parcelamento do solo urbano (BRASIL, 1979), exigindo o mapeamento preciso de vértices de limites vinculados ao Sistema Geodésico Brasileiro (SIRGAS 2000), conforme preconizado na legislação vigente (BRASIL, 2022), além da avaliação de atributos morfométricos para mitigar riscos de instabilidade de encostas e subsidiar projetos de drenagem pluvial (VALERIANO, 2008).

A análise da dinâmica territorial de Ponte Nova entre 1990 e 2020, desenvolvida a partir das séries históricas de uso e cobertura do solo da plataforma MapBiomas, revelou uma expansão significativa da mancha urbana (com acréscimo de 506 ha), ocorrendo precipuamente sobre terras agrícolas, paralelamente a processos de regeneração de formações florestais nativas. Em vetores de adensamento populacional e econômico, como o distrito de Rosário do Pontal, a aplicação de geotecnologias e de modelagens prospectivas é fundamental para simular cenários futuros de ocupação e antecipar impactos socioambientais (EASTMAN, 2016). O emprego da base de dados do MapBiomas, associado aos Modelos Digitais de Elevação (MDE NASADEM), análises morfométricas e simulação preditiva via Land Change Modeler (LCM) com Redes Neurais Artificiais (Multilayer Perceptron - MLP, validado com o dado de referência do MapBiomas 2024 sob índice Kappa de 98,08%), fornece insumos indispensáveis para o planejamento urbano preventivo.

A recente literatura científica tem evidenciado que a integração de métodos de inteligência artificial e aprendizado de máquina revoluciona a acurácia das predições territoriais (FONTANA et al., 2023). Modelos preditivos contemporâneos, em especial as Redes Neurais Artificiais (RNA) associadas a algoritmos de transição espacial, superam abordagens tradicionais ao conseguir capturar as complexas dependências e os vetores não-lineares que impulsionam o espraiamento urbano (GAO et al., 2025). Tais inovações

tecnológicas oferecem aos gestores públicos simulações de alta confiabilidade que subsidiam o planejamento preventivo e o desenvolvimento sustentável em cenários de crescente urbanização (KLANREUNGSANG; NILSONTHI, 2024).

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo apresentar a estruturação da base de dados geoespaciais do pré-projeto cadastral do município de Ponte Nova - MG. Para tanto, integram-se a análise morfométrica e a simulação prospectiva das transformações do solo, estabelecendo um arcabouço técnico rigoroso e alinhado às diretrizes nacionais vigentes para subsidiar o ordenamento territorial e a implementação do Cadastro Territorial Multifinalitário na região.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Aquisição e reclassificação temática dos dados

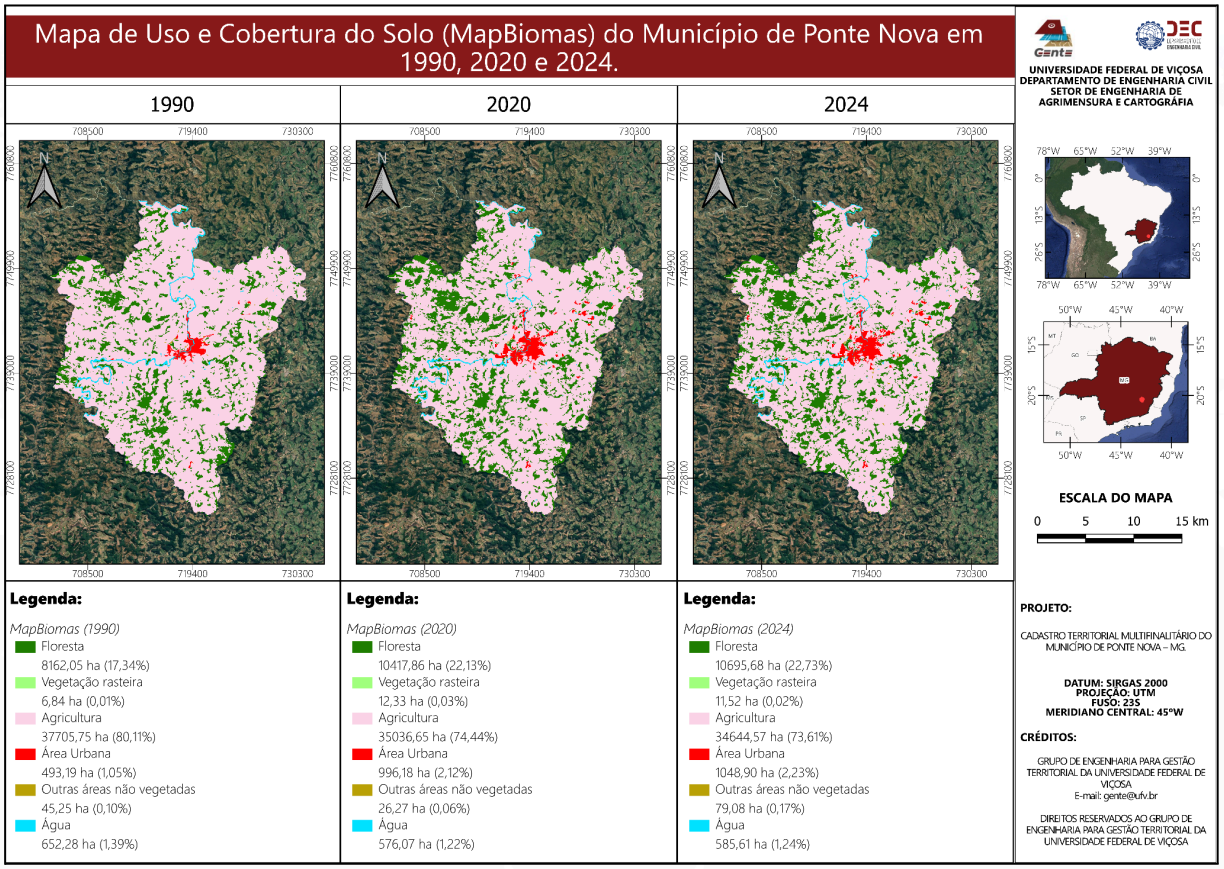
Os dados referentes ao uso e cobertura do solo foram obtidos a partir da plataforma MapBiomas, uma iniciativa colaborativa que produz séries históricas anuais por meio de classificação automática baseada em algoritmos de aprendizado de máquina aplicados a imagens de satélite da missão Landsat, com resolução espacial de 30 metros.

A classificação original do MapBiomas apresenta uma estrutura hierárquica detalhada, composta por diversas classes e subclasses. Para adequar a base de dados às necessidades da modelagem proposta para o município de Ponte Nova (MG), procedeu-se à generalização temática das classes. Essa etapa visou reduzir a complexidade do modelo e otimizar a análise das dinâmicas espaciais. Assim, as categorias originais foram reclassificadas em seis classes temáticas abrangentes:

- **Floresta:** englobando formações florestais naturais e áreas com vegetação arbórea densa;
- **Vegetação rasteira:** incluindo formações campestres, pastagens naturais e áreas com vegetação de porte baixo;
- **Agricultura:** abrangendo áreas agrícolas temporárias e permanentes, bem como mosaicos de uso agropecuário;
- **Área urbana:** representando regiões com predominância de infraestrutura construída e ocupação antrópica consolidada;
- **Outras áreas não vegetadas:** incluindo solos expostos, áreas degradadas, mineração e outras superfícies sem cobertura vegetal significativa;
- **Água:** correspondendo a corpos hídricos naturais e artificiais.

A partir desta reclassificação, foram gerados e padronizados os mapas de uso e cobertura do solo para o município de Ponte Nova, referentes aos anos base de 1990, 2020 e 2024, conforme ilustrado na Figura 1. Estes produtos cartográficos estabeleceram a base fundamental para a modelagem espaço-temporal da pesquisa.

Figura 1 – Mapa de Uso e Cobertura do Solo (MapBiomas) do município de Ponte Nova em 1990, 2020 e 2024.



Fonte: O Autor (2026).

2.2 Modelagem de mudança do uso e cobertura do solo

A avaliação das alterações na cobertura do solo e a predição de cenários futuros foram realizadas utilizando o módulo Land Change Modeler (LCM), operado no ambiente do software TerrSet2020. Segundo Eastman (2016), o LCM emprega uma abordagem empírica e analítica focada em quantificar as dinâmicas de área e modelar espacialmente os padrões de conversão da terra entre diferentes recortes temporais.

Para a execução da modelagem no município de Ponte Nova, definiram-se os mapas de uso e cobertura de 1990 e 2020 como estados inicial e final, respectivamente. A primeira etapa da modelagem consistiu em uma análise retrospectiva, gerando matrizes de transição que mapeiam as perdas, os ganhos e as persistências espaciais de cada classe temática ao longo das três décadas.

A etapa subsequente envolveu a parametrização do submodelo de transição, focando nas dinâmicas de conversão das classes de uso e cobertura em direção à classe 'Área urbana'. Para capturar os fatores impulsionadores e restritivos do espraiamento urbano, foram selecionadas e padronizadas variáveis explicativas (drivers) na mesma resolução espacial dos mapas temáticos (30 m). A partir do Modelo Digital de Elevação NASADEM, extraíram-se as variáveis topográficas de altimetria e declividade; paralelamente, elaboraram-se cartas de distância euclidiana em relação à rede hidrográfica, ao sistema viário principal e às áreas urbanas preexistentes. A inclusão desses planos de informação apoia-se na premissa de que a expansão antrópica ocorre preferencialmente próxima a infraestruturas consolidadas e em terrenos de topografia suave.

O treinamento do submodelo para determinar a suscetibilidade do terreno à mudança foi conduzido por meio do algoritmo de Redes Neurais Artificiais do tipo Multilayer Perceptron (MLP). Durante esta fase, o algoritmo calibrou iterativamente os pesos sinápticos para identificar relações não-lineares complexas entre as variáveis explicativas inseridas e as transições efetivamente observadas entre 1990 e 2020. O produto final desta etapa foi a geração de mapas de potencial de transição, que indicam, numa escala contínua, a probabilidade de cada pixel ser convertido em área urbana.

2.3 Validação do modelo e projeção de cenários

A confiabilidade de simulações preditivas em gestão territorial depende intrinsecamente do rigor de sua validação estatística. Para atestar a capacidade de generalização e aprendizagem do modelo treinado pela rede neural, o algoritmo ajustado (com base no período 1990-2020) foi utilizado para gerar um cenário simulado de uso e cobertura do solo para o ano de 2024. Este cenário predito foi submetido a um processo de tabulação cruzada (cross-tabulation) pixel a pixel com o mapa real do MapBiomas referente ao mesmo ano de 2024, tratado como o dado de referência absoluta (verdade terrestre).

A avaliação da acurácia global foi estruturada por meio de matrizes de erro (ou confusão), as quais expressam o nível de acertos e falsos positivos para cada classe de uso (NERY, 2013). Para isolar a precisão real da modelagem, utilizou-se o coeficiente Kappa, uma métrica robusta que quantifica a concordância espacial, suprimindo a proporção de acertos que poderiam ocorrer puramente ao acaso. Os limiares de desempenho propostos por Fonseca (2000) foram adotados como padrão de interpretação qualitativa, em que índices próximos a 1,0 indicam modelagens altamente precisas e representativas da dinâmica local.

Uma vez comprovada a validade do mapa de potencial espacial (que responde à pergunta "onde a mudança ocorrerá"), o processo de projeção incorporou as Cadeias de Markov (Markov Chains) para responder à pergunta "quanto de área irá mudar". O algoritmo de Markov calculou as matrizes de probabilidade temporal, projetando as taxas anuais de transição observadas no passado para intervalos futuros.

Integrando o potencial espacial do MLP com as matrizes quantitativas de Markov (estimativa de área em hectares), o LCM alocou competitivamente as transições na paisagem, gerando os cenários prospectivos finais para o município de Ponte Nova no ano de 2050. Esses cenários modelados constituem instrumentos de suporte à decisão, viabilizando análises de adensamento, identificação de novos vetores de crescimento e planejamento alinhado à justiça territorial.

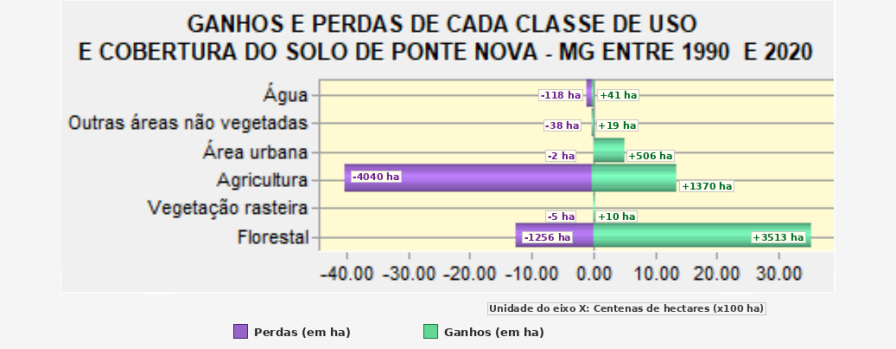
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Dinâmica de transição do uso e cobertura do solo (1990 a 2020)

A análise comparativa entre os anos de 1990 e 2020 permitiu quantificar as transições no município de Ponte Nova. Os resultados demonstraram que a classe "Floresta" obteve um ganho expressivo de 3.513 ha contra uma perda de 1.256 ha, sugerindo uma tendência de recuperação florestal nativa. Em contrapartida, a "Agricultura" apresentou forte retração, com perdas de 4.040 ha e ganhos de apenas 1.370 ha.

O processo de urbanização mostrou-se consistente, evidenciado pelo ganho de 506 ha na classe "Área urbana" com perda praticamente nula (-2 ha). A Figura 2 sintetizam as matrizes de perdas e ganhos para o período analisado.

Figura 2 – Ganhos e perdas de cada classes de uso e cobertura do solo de Ponte Nova – MG entre 1990 e 2020.



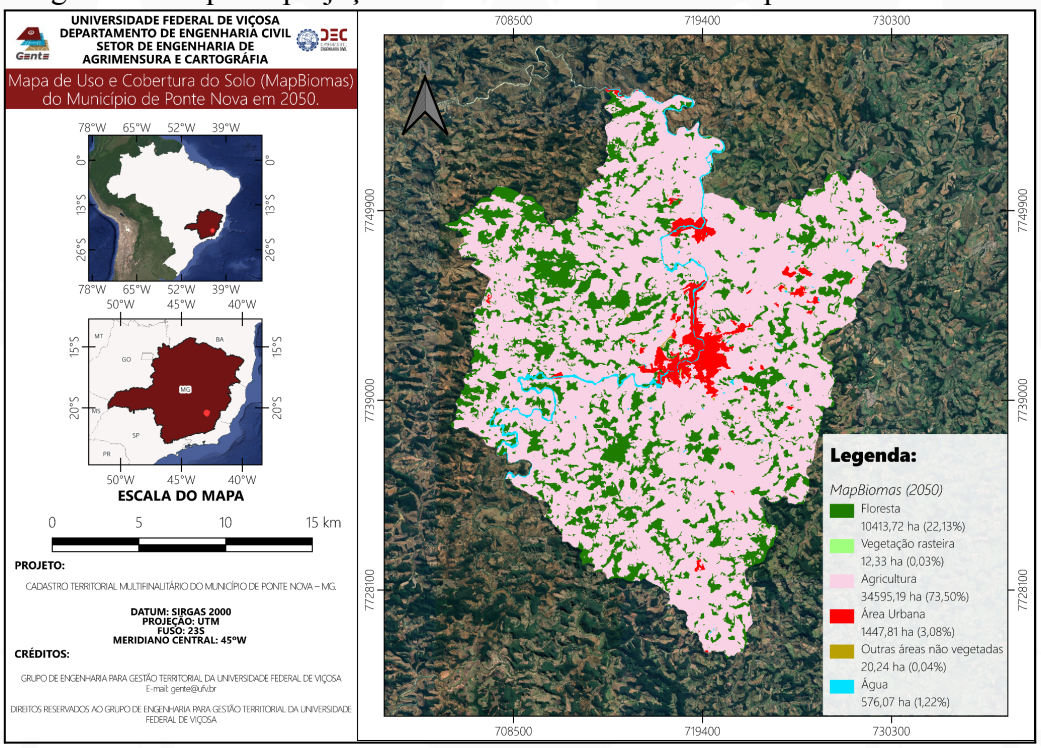
Fonte: O Autor (2026).

3.2 Validação da rede neural e predições futuras (2024-2050)

A validação espacial do modelo foi conduzida mediante o confronto direto entre a classificação observada no MapBiomas 2024 e o cenário simulado para o mesmo ano pela Rede Neural MLP. A tabulação cruzada pixel a pixel entre os dois planos de informação revelou elevada concordância espacial, resultando em um Índice Kappa de 98,08% e acurácia global de 98,5%, o que atesta a capacidade do modelo em replicar os padrões recentes de transição do solo no município.

Com a validação do modelo ancorada no cenário de 2024, que atestou a alta eficiência preditiva da rede neural com um Índice Kappa de 98,08%, o algoritmo foi parametrizado para a geração de cenários prospectivos de uso e cobertura do solo. As projeções para o ano de 2050 permite a análise da dinâmica futura de ocupação do território de Ponte Nova (MG), cujo resultado espacial sucessivo pode ser observado na Figura 3.

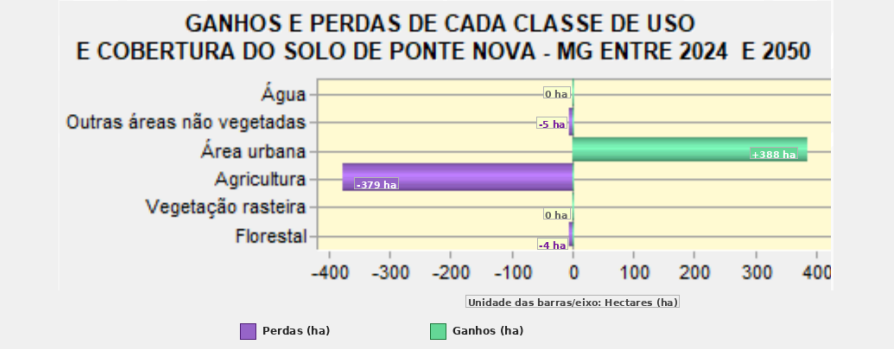
Figura 3 – Mapa da projeção de Uso e Cobertura do Solo para o ano de 2050.



Fonte: O Autor (2026).

Para inferir o comportamento do crescimento urbano e as transformações na paisagem projetadas até meados do século, repetiu-se a análise comparativa de perdas e ganhos entre as áreas ocupadas pelas classes preditas pelo modelo. Os resultados consolidados desta simulação preditiva para o período de 2024 a 2050 estão expressos graficamente na Figura 4.

Figura 4 – Ganhos e perdas projetados para as classes de uso e cobertura do solo de Ponte Nova (MG) entre 2024 e 2050.



Fonte: O Autor (2026).

A análise das predições evidencia que o município continuará passando por transformações expressivas impulsionadas pela ocupação antrópica. Verifica-se um avanço significativo da classe "Área urbana", com um ganho projetado de 388 ha. Este crescimento ocorrerá predominantemente em detrimento da classe "Agricultura", que apresenta uma perda simulada proporcional de 379 ha no mesmo período. As demais classes naturais e seminaturais apresentam um comportamento de estabilidade, com perdas irrelevantes projetadas para as áreas florestais (-4 ha) e outras áreas não vegetadas (-5 ha).

Espacialmente, as projeções revelam vetores de crescimento específicos, com destaque não apenas para a contínua consolidação urbana no entorno da sede municipal, mas para a emergência de novos polos de expansão nos distritos. Em particular, os cenários para o distrito de Rosário do Pontal indicam uma perspectiva de crescimento urbano acentuado. Conforme observado na progressão temporal do mapa preditivo, o avanço da mancha urbana em direção a este distrito sugere um intenso processo de adensamento.

Essa dinâmica futura é impulsionada por fatores condicionantes favoráveis, notadamente a topografia local que, em comparação a outras regiões do município, oferece áreas mais propícias ao loteamento, aliada à sua localização estratégica. Tais características consolidam Rosário do Pontal como o principal vetor secundário de desenvolvimento do município nas próximas décadas, caracterizando uma forte transição e conversão de áreas até então destinadas à agricultura para o uso residencial e comercial.

Embora o modelo tenha alcançado alto desempenho estatístico na validação, é fundamental destacar suas limitações operacionais e conceituais. A utilização de imagens da série Landsat com resolução espacial de 30 metros restringe a detecção de microtransformações urbanas, como o surgimento de pequenos loteamentos clandestinos ou fragmentações pontuais de lotes. Além disso, a simulação fundamenta-se na premissa de estacionariedade das variáveis explicativas (drivers), assumindo que os vetores de atração e restrição (como distâncias de rodovias e declividade) manterão comportamento idêntico até 2050. O modelo não contempla variáveis exógenas e imprevisíveis, tais como alterações futuras no Plano Diretor Municipal, revisões do Perímetro Urbano, oscilações econômicas no setor imobiliário ou grandes obras de infraestrutura regional. Assim, os cenários gerados devem ser interpretados como tendências probabilísticas baseadas no histórico recente,

operando como instrumentos orientadores e não determinísticos para a gestão do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM).

4 CONCLUSÃO

A estruturação da base de dados geoespaciais do pré-projeto cadastral do município de Ponte Nova (MG) demonstrou que a integração entre a análise morfométrica e a modelagem espacial prospectiva constitui um instrumento de elevado valor para o Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM). A abordagem empregada, fundamentada em Redes Neurais Artificiais do tipo Multilayer Perceptron (MLP) e Cadeias de Markov, provou ser eficaz para mapear as transformações do solo e simular cenários futuros com rigor técnico, atingindo um índice Kappa de 98,08% na validação com o dado de referência de 2024.

A análise espaço-temporal retrospectiva (1990 a 2020) evidenciou o crescimento contínuo da mancha urbana, caracterizado por um ganho de 506 ha. Esse avanço ocorreu precipuamente sobre terras agrícolas, as quais registraram uma perda de 4.040 ha no mesmo intervalo, ao mesmo tempo em que se observou a recuperação de áreas florestais nativas com acréscimo de 3.513 ha. As simulações preditivas para o período de 2024 a 2050 indicam a manutenção dessa dinâmica de expansão, projetando um ganho de 388 ha na classe de área urbana e uma retração correspondente de 379 ha na atividade agrícola. Na dimensão espacial, além da consolidação da sede municipal, o modelo identificou o distrito de Rosário do Pontal como o principal vetor secundário de crescimento, motivado por sua topografia mais suave e posição estratégica no município.

Em um município marcado por severas condicionantes físico-naturais e relevo predominantemente declivoso, a antecipação dessas tendências de ocupação é indispensável para conter a ocupação de áreas de risco e direcionar os investimentos em infraestrutura. Ao associar a predição da dinâmica territorial às diretrizes da Portaria MDR nº 3.242/2022, o arcabouço técnico desenvolvido consolida-se como uma ferramenta essencial de planejamento urbano preventivo, capaz de subsidiar a tomada de decisões no âmbito do CTM e promover a justiça territorial.

REFERÊNCIAS

BATTY, M. ***Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals.*** Cambridge: MIT Press, 2008.

BRASIL. ***Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979. Dispõe sobre o parcelamento do solo urbano e dá outras providências.*** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 18247, 20 dez. 1979.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. ***Portaria nº 3.242, de 9 de novembro de 2022. Aprova as diretrizes para a criação, a instituição e a atualização do Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) nos municípios brasileiros.*** Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, n. 213, p. 45, 11 nov. 2022.

EASTMAN, J. R. ***TerrSet: manual de uso e tutoriais.*** Worcester: Clark University, 2016.

ERBA, D. A. ***El Catastro Multifinalitario en América Latina.*** Cambridge: Lincoln Institute of Land Policy, 2008.

FONSECA, F. P. ***Avaliação da acurácia e validação em classificações de uso e cobertura do***

solo. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2000.

FONTANA, A. G. et al. ***Analysis of past and future urban growth on a regional scale using remote sensing and machine learning.*** Frontiers in Remote Sensing, v. 4, 2023. Disponível em: https://www.frontiersin.org.

GAO, Y. et al. ***Urban Expansion Scenario Prediction Model: Combining Multi-Source Big Data, a Graph Attention Network, a Vector Cellular Automata, and an Agent-Based Model.*** Remote Sensing, v. 17, n. 13, 2025. Disponível em: https://www.mdpi.com.

KLANREUNGSANG, B.; NILSONTHI, P. ***Urban Land Use Changes Simulation with CA-ANN Model: A Case Study of Mae Sot District, Tak Province, Thailand.*** International Journal of Geoinformatics, v. 20, n. 6, p. 11-23, 2024. Disponível em: doi.org. Acesso em: 8 set. 2026.

LAMBIN, E. F. et al. ***The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths.*** Global Environmental Change, v. 11, n. 4, p. 261-269, 2001.

LOCH, C.; ERBA, D. A. ***Cadastro Técnico Multifinalitário: rural e urbano.*** Florianópolis: Editora da UFSC, 2007.

MAPBIOMAS. ***Plataforma MapBiomas: coleção de dados anuais de uso e cobertura do solo no Brasil.*** Versão 2024. Disponível em: https://mapbiomas.org. Acesso em: 15 jan. 2026.

NERY, C. V. M. ***Análise da precisão de classificadores e matrizes de confusão em geoprocessamento***. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2013.

OJIMA, R. ***Dimensões demográficas das aglomerações urbanas: ordenamento territorial e perspectivas para o planejamento regional.*** Revista Brasileira de Estudos de População, v. 24, n. 2, p. 277-291, 2007.

VALERIANO, M. M. ***Topodata: guia de utilização de dados geomorfológicos locais.*** São José dos Campos: INPE, 2008.