

DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DA EXPANSÃO URBANA EM ARARAQUARA (1985-2020) E A VULNERABILIDADE DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI

Pedro Luiz Becaro Crioni

Graduado em Geografia, Mestre em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, São Paulo, Brasil¹
pedro.crioni@unesp.br

Elias Hideo Teramoto

Graduado em Geologia, Mestre e Doutor em Geociências e Meio Ambiente pela Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, São Paulo, Brasil¹
elias.hideo-teramoto@unesp.br

Chang Hung Kiang

PhD em Geologia pela Northwestern University, Livre Docente do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Rio Claro, São Paulo, Brasil¹
chang.hung-kiang@unesp.br

RESUMO: A expansão urbana desordenada acarreta severos impactos ambientais, como a supressão de vegetação, a fragmentação de habitats e a impermeabilização do solo, afetando diretamente a recarga de aquíferos e aumentando o risco de contaminação hídrica. O município de Araraquara, situado no centro do Estado de São Paulo e sobre a área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), tem apresentado um intenso processo de urbanização. Este estudo analisou a dinâmica espaço-temporal do Uso e Cobertura da Terra entre 1985 e 2020, utilizando dados da série histórica do MapBiomas (Coleção 10) e técnicas de álgebra de mapas. Os resultados revelam um aumento expressivo de aproximadamente 157% na mancha urbana consolidada, que evoluiu de 26,5 km² em 1985 para 68,1 km² em 2020, com uma taxa média de crescimento areal de 1,17 km² ao ano. Embora esse crescimento apresente elevada linearidade estatística ao longo do período, a análise espacial integrada evidencia forte heterogeneidade morfológica, combinando consolidação contígua em setores específicos do município e espraiamento fragmentado em áreas periurbanas. Verificou-se que 61,5% da expansão ocorreu sobre áreas previamente ocupadas por Mosaicos de Agricultura e Pastagem. A ocupação direta sobre o afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG) manteve-se incipiente (0,05% da expansão), contudo observou-se adensamento urbano progressivo nas zonas de amortecimento (buffers de 1,5 km a 3,0 km), além de intensificação agroindustrial no interior da área de recarga, configurando um cenário de vulnerabilidade hidrogeológica indireta e cumulativa.

Palavras-chave: MapBiomas; Dinâmica Territorial; Sistema Aquífero Guarani; Planejamento Urbano; Araraquara.

SPATIO-TEMPORAL DYNAMICS OF URBAN EXPANSION IN ARARAQUARA (1985–2020) AND THE VULNERABILITY OF THE GUARANI AQUIFER SYSTEM

ABSTRACT: Disorderly urban expansion causes severe environmental impacts, including vegetation suppression, habitat fragmentation, and impervious surfaces, directly affecting aquifer recharge and increasing the risk of water contamination. The municipality of Araraquara, located in central São Paulo State and overlying the outcrop area of the Guarani Aquifer System (GAS), has undergone an intense urbanization process. This study analyzed the spatiotemporal dynamics of Land Use and Land Cover between 1985 and 2020 using data from the MapBiomas historical series (Collection 10) and map algebra techniques. The results reveal a significant increase of approximately 157% in the consolidated urban footprint, which expanded from 26.5 km² in 1985 to 68.1 km² in 2020, with an average areal growth rate of 1.17 km² per year. Although this growth exhibits high statistical linearity over time, the integrated spatial analysis reveals pronounced morphological heterogeneity, combining contiguous

¹ Endereço para correspondência: Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Laboratório de Estudos de Bacias (LEBAC), Avenida 24-A, 1515, Bela Vista, CEP: 13506-900, Rio Claro, São Paulo, Brasil.

urban consolidation in specific sectors of the municipality with fragmented peri-urban sprawl. It was found that 61.5% of the expansion occurred over areas previously occupied by mosaics of agriculture and pasture. Direct urban occupation over the Guarani Aquifer System outcrop remained incipient (0.05% of the expansion); however, progressive urban densification was observed within buffer zones (1.5 km to 3.0 km), along with intensified agroindustrial activities within the recharge area, configuring a scenario of indirect and cumulative hydrogeological vulnerability.

Keywords: MapBiomas; Territorial Dynamics; Guarani Aquifer System; Urban Planning; Araraquara.

DINÁMICA ESPACIO-TEMPORAL DE LA EXPANSIÓN URBANA EN ARARAQUARA (1985-2020) Y LA VULNERABILIDAD DEL SISTEMA ACUÍFERO GUARANÍ

RESUMEN: La expansión urbana desordenada genera severos impactos ambientales, como la supresión de vegetación, la fragmentación de hábitats y la impermeabilización del suelo, afectando directamente la recarga de acuíferos y aumentando el riesgo de contaminación hídrica. El municipio de Araraquara, situado en el centro del Estado de São Paulo y sobre el área de afloramiento del Sistema Acuífero Guarani (SAG), ha experimentado un intenso proceso de urbanización. Este estudio analizó la dinámica espacio-temporal del Uso y la Cobertura de la Tierra entre 1985 y 2020, utilizando datos de la serie histórica de MapBiomas (Colección 10) y técnicas de álgebra de mapas. Los resultados revelan un aumento expresivo de aproximadamente 157% en la mancha urbana consolidada, que pasó de 26,5 km² en 1985 a 68,1 km² en 2020, con una tasa media de crecimiento areal de 1,17 km² por año. Aunque este crecimiento presenta una elevada linealidad estadística a lo largo del período analizado, el análisis espacial integrado evidencia una marcada heterogeneidad morfológica, combinando consolidación urbana contigua en sectores específicos del municipio con procesos de expansión fragmentada en áreas periurbanas. Se identificó que el 61,5% de la expansión ocurrió sobre áreas previamente ocupadas por mosaicos de agricultura y pastura. La ocupación urbana directa sobre el afloramiento del Sistema Acuífero Guarani se mantuvo incipiente (0,05% de la expansión); sin embargo, se observó una densificación urbana progresiva en las zonas de amortiguamiento (buffers de 1,5 km a 3,0 km), así como una intensificación agroindustrial en el interior del área de recarga, configurando un escenario de vulnerabilidad hidrogeológica indirecta y acumulativa.

Palabras clave: MapBiomas; Dinámica Territorial; Sistema Acuífero Guarani; Planificación Urbana; Araraquara.

Introdução

A urbanização global tem avançado significativamente nas últimas cinco décadas, com a proporção da população residente em áreas urbanas aumentando de 30% em 1960 para 56% em 2021 (WORLD BANK, 2023). No Brasil, esse processo foi ainda mais intenso, passando de 46% para 87% no mesmo período, refletindo uma taxa de urbanização acima da média mundial.

Historicamente, a expansão urbana tem sido interpretada, na literatura especializada, como resultado da combinação de múltiplos fatores estruturais, entre os quais se destacam o crescimento populacional e as transformações nos sistemas de mobilidade associadas aos avanços tecnológicos no transporte (ISMAEL, 2021). No contexto brasileiro, a partir da década de 1990, observa-se um processo de reestruturação da rede urbana, marcado pela desconcentração demográfica e produtiva das grandes metrópoles em direção às cidades médias, o que tem contribuído para a expansão das áreas periféricas e para a adoção de padrões de crescimento urbano mais dispersos (SILVA, SATHLER e MACEDO, 2022).

Do ponto de vista físico, a expansão urbana se caracteriza pela substituição da cobertura vegetal natural por superfícies impermeáveis, como edificações, vias pavimentadas e estacionamentos (MAN et al., 2019). Tais mudanças estão associadas a diversos impactos ambientais, incluindo a perda e fragmentação da cobertura vegetal, a degradação de habitats e a redução da conectividade ecológica em ambientes urbanos e periurbanos (KOWE; MUTANGA; DUBE, 2021). Além disso, a expansão das áreas urbanizadas é responsável pelo aumento local das temperaturas, formando as chamadas "ilhas de calor" (MOHAN; SATI; BHATI, 2020; ADEYEMI et al., 2021). É importante destacar que a impermeabilização do solo altera significativamente o ciclo hidrológico, resultando em maior incidência e intensidade de

inundações (por exemplo, DEVI; SRIDHARAN; KUIRY, 2019; PATEL; GOYAL; THOMAS, 2021; WIJERATNE; LI, 2022).

Outro aspecto crítico da urbanização é o seu impacto sobre a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos. Entre os principais efeitos sobre os aquíferos, especialmente os rasos, destacam-se a redução da recarga hídrica, as alterações na interação entre águas superficiais e subterrâneas e a contaminação difusa da água subterrânea (STEVENAZZI, 2017; HAN et al., 2017; AFONSO et al., 2020).

Diante dos desafios ambientais associados à urbanização, a quantificação do crescimento urbano tornou-se essencial para subsidiar estratégias de planejamento territorial. Entre as metodologias mais utilizadas para esse fim, destacam-se as técnicas de Sensoriamento Remoto, que possibilitam a análise das taxas de expansão urbana em diferentes escalas e períodos (LI, 2019; AKIN; ERDOĞAN, 2020; CHETTRY; SURAWAR, 2021). Atualmente, o avanço do processamento em nuvem e a disponibilização de séries históricas de uso e cobertura da terra, como a iniciativa MapBiomass (Coleção 10), permitem análises de longo prazo com alta consistência temporal, contornando limitações associadas a classificações pontuais e oferecendo dados validados para a gestão ambiental (GORELICK et al., 2017; SOUZA et al., 2020).

Assim como ocorre em outras cidades de médio porte no Brasil, Araraquara, localizada no centro do estado de São Paulo, vem experimentando um rápido crescimento de sua área urbana nas últimas décadas. Segundo Duarte e Leite (2020), essa expansão exerce pressões ambientais sobre o Bioma Cerrado, intensificando os impactos da urbanização. Além disso, Araraquara se situa na área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), um dos principais reservatórios de água subterrânea da América do Sul, essencial para o abastecimento público e agrícola. No entanto, os impactos da urbanização sobre a qualidade das águas subterrâneas do SAG ainda são pouco estudados, evidenciando a necessidade de pesquisas mais aprofundadas.

A hipótese central deste estudo é que a expansão urbana de Araraquara, embora não tenha promovido a ocupação direta e maciça da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, apresenta um padrão espacial heterogêneo que pressiona progressivamente suas zonas de amortecimento e se articula com processos de intensificação do uso agroindustrial no interior da área de recarga. Pressupõe-se que essa combinação de expansão urbana horizontal, fragmentação periurbana e mudanças no uso do solo rural configura um cenário de vulnerabilidade hidrogeológica crescente, cujo entendimento exige a integração de métricas volumétricas, direcionais e morfológicas da urbanização.

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica espaço-temporal da área urbana de Araraquara entre 1985 e 2020, utilizando dados da série histórica do MapBiomass (Coleção 10), e avaliar quantitativamente a pressão desse crescimento sobre a área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani e suas zonas de entorno.

Materiais e Métodos

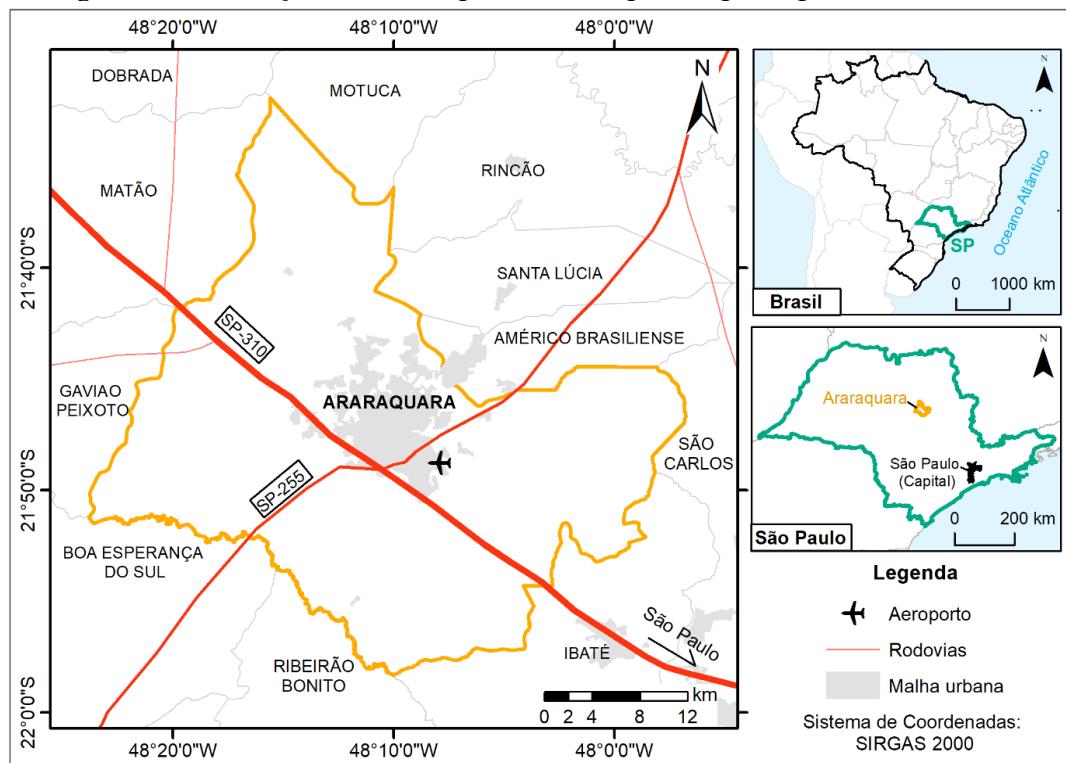
Área de estudo

O presente estudo foca no município de Araraquara, localizado a aproximadamente 270 km da capital, São Paulo. Araraquara abrange uma área total de 1.003,625 km² e faz divisa com os municípios de Dobrada, Motuca, Gavião Peixoto, Santa Lúcia, Américo Brasiliense, Ibaté, Ribeirão Bonito, Boa Esperança do Sul, Rincão, Matão e São Carlos. Acesso a Araraquara é possível por meio da Rodovia Washington Luiz (SP – 310), pela Rodovia Comandante João Ribeiro de Barros (SP – 255), além do acesso aéreo pelo aeroporto Bartolomeu de Gusmão e o acesso ferroviário para escoamento de produtos (conforme ilustrado na Figura 1). Em 2021, a

população estimada de Araraquara era de 240.542 habitantes, conforme dados do IBGE (2022).

A representação cartográfica da área de estudo abrange as folhas topográficas do IBGE (1971) na escala de 1:50.000, conhecidas como Folha Boa Esperança do Sul (SF-22-XDVI-3), Araraquara (SF-22-X-D-VI-4), Nova Europa (SF-22-X-D-V-4), Matão (SF-22-X-D-VI-1) e Rincão (SF-22-X-D-VI-2). Do ponto de vista geográfico, o município está situado com seu ponto central a uma latitude de 21°47'40" sul e uma longitude de 48°10'32" oeste, a uma altitude média de 664 metros.

Figura 1: Localização do município de Araraquara e principais vias de acesso



Fonte: Elaborado pelos autores.

Base de dados de uso e cobertura da terra

Para a análise da dinâmica espaço-temporal da expansão urbana, utilizou-se a série histórica de uso e cobertura da terra do projeto MapBiomas (Coleção 10). Embora essa base disponibilize informações anuais até 2024, o presente estudo restringiu a análise ao período de 1985 a 2020. Essa escolha fundamenta-se na adoção de intervalos temporais regulares, com recortes quinquenais (anos redondos), o que assegura maior comparabilidade espaço-temporal ao longo da série histórica. Adicionalmente, o recorte temporal até 2020 garante maior compatibilidade com os dados censitários do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), reduzindo incertezas associadas a extrações demográficas recentes.

O MapBiomas consiste em uma iniciativa científica multi-institucional dedicada à produção anual de mapas de uso e cobertura da terra, baseada no processamento pixel a pixel do acervo histórico de imagens da série Landsat. A classificação é realizada por meio de algoritmos de aprendizado de máquina, com destaque para o classificador Random Forest, aplicados a grandes volumes de dados em ambiente de computação em nuvem, com suporte da plataforma Google Earth Engine (SOUZA et al., 2020). Essa abordagem metodológica assegura elevada consistência temporal e comparabilidade interanual, reduzindo incertezas

associadas a classificações pontuais ou manuais e tornando o conjunto de dados particularmente adequado para análises espaço-temporais de longo prazo (MAPBIOMAS, 2023).

Os dados vetoriais referentes ao município de Araraquara foram extraídos para os anos de 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 e 2020, considerando-se prioritariamente a classe “Infraestrutura Urbana”. Adicionalmente, foram consideradas as classes de uso agropecuário e de vegetação nativa, empregadas na análise das transições de uso e cobertura da terra e na avaliação das dinâmicas de conversão espacial associadas à expansão urbana.

Para a delimitação da área potencialmente vulnerável do ponto de vista hidrogeológico, utilizou-se o arquivo vetorial correspondente à área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), disponibilizado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE), com base no Mapa Geológico do Estado de São Paulo, na escala 1:250.000.

Processamento e análise espacial

O processamento dos dados e a geração das métricas analíticas foram realizados em ambiente computacional utilizando a linguagem de programação Python, com suporte das bibliotecas geoespaciais Geopandas e Matplotlib. A metodologia analítica consistiu em seis etapas principais, estruturadas de modo a contemplar as diferentes dimensões da expansão urbana analisada.

Pré-processamento

Os dados do MapBiomas foram utilizados em formato vetorial, permitindo a aplicação de operações de álgebra de mapas por meio de interseções espaciais entre classes de uso do solo em diferentes anos. Todos os arquivos vetoriais (shapefiles) foram padronizados para o Sistema de Referência de Coordenadas SIRGAS 2000 / UTM Zona 23S (EPSG: 31983), assegurando precisão no cálculo de áreas métricas (hectares e quilômetros quadrados) e minimizando distorções associadas ao uso de coordenadas geográficas.

Para a análise quantitativa da evolução da área total urbanizada e das transições de uso do solo (Figuras 4 e 6), bem como para as análises de distribuição direcional da expansão urbana e de pressão sobre zonas de amortecimento do Sistema Aquífero Guarani (Figuras 7 e 9), considerou-se a totalidade dos polígonos classificados como “Infraestrutura Urbana”.

Quantificação da Evolução

Foi calculada a área total da classe “Infraestrutura Urbana” para cada ano da série histórica compreendida entre 1985 e 2020. A partir desses valores, aplicou-se uma regressão linear simples com o objetivo de estimar a taxa média anual de crescimento da área urbanizada (km^2/ano) e o coeficiente de determinação (R^2). Ressalta-se que a elevada linearidade observada representa uma regularidade do crescimento volumétrico agregado ao longo do período analisado, não implicando homogeneidade espacial, morfológica ou funcional da expansão urbana, as quais foram investigadas por meio de métricas complementares descritas nas seções subsequentes.

Análise de Transição (Álgebra de Mapas)

Para identificar a origem das novas áreas urbanas, realizou-se a interseção espacial (spatial overlay) entre os mapas de uso e cobertura da terra dos anos de 1985 e 2020. Essa técnica permitiu quantificar quais classes de cobertura da terra — como pastagem, cana-de-açúcar e vegetação nativa — foram convertidas em infraestrutura urbana ao longo do período analisado, possibilitando a avaliação dos principais vetores de transformação do uso do solo associados à expansão urbana.

Análise de Direcionalidade

A direcionalidade da expansão urbana de Araraquara foi analisada por meio de duas abordagens complementares, voltadas à quantificação do volume espacial incorporado e do alcance linear da urbanização entre 1985 e 2020, utilizando dados vetoriais da classe ‘Infraestrutura Urbana’ da Coleção 10 do MapBiomas.

Inicialmente, avaliou-se a distribuição direcional do volume de expansão urbana por meio da identificação das novas áreas urbanizadas entre 1985 e 2020, obtidas a partir da operação de diferença espacial entre as manchas urbanas desses anos (Figura 6). Todas as áreas classificadas como infraestrutura urbana foram consideradas, sem aplicação de filtros de área mínima, de modo que a análise direcional fosse baseada no somatório areal efetivamente incorporado ao tecido urbano (km^2), independentemente do tamanho individual dos fragmentos. Essa abordagem privilegia a quantificação do volume total de expansão em cada direção, em detrimento da simples contagem de ocorrências, permitindo uma avaliação mais robusta da contribuição espacial de cada vetor de crescimento.

A partir do centróide do maior polígono urbano consolidado em 1985, definido como núcleo urbano de referência, calculou-se o azimute de cada área incorporada ao tecido urbano. As áreas foram agregadas em oito setores direcionais (N, NE, E, SE, S, SW, W e NW), permitindo a quantificação do volume absoluto (km^2) e relativo (%) da expansão urbana por direção.

Complementarmente, realizou-se uma análise radial do alcance espacial da urbanização, voltada à identificação da máxima projeção linear da mancha urbana em diferentes direções (Figura 7). Para essa etapa, o mesmo centro de referência foi utilizado, e o espaço foi segmentado em 16 setores direcionais (intervalos de $22,5^\circ$). Em cada setor, calculou-se a distância radial máxima entre o centro urbano original e o ponto urbanizado mais distante, distinguindo-se a mancha urbana contínua — fisicamente conectada ao núcleo inicial — da mancha urbana total, que inclui fragmentos dispersos.

Ressalta-se que a métrica radial adotada expressa exclusivamente o alcance linear máximo da urbanização em cada direção, não incorporando informações relativas à densidade construtiva, à continuidade do tecido urbano ou ao volume total de área urbanizada. Dessa forma, valores elevados de distância radial indicam a projeção espacial mais distante da urbanização no território, e não, necessariamente, maior intensidade ou concentração do uso urbano.

Enquanto a primeira abordagem permite identificar os vetores predominantes de crescimento em termos de área incorporada ao tecido urbano, a análise radial evidencia padrões de espraiamento, fragmentação e avanço linear da urbanização no território municipal. O processamento espacial e a geração dos gráficos foram realizados em ambiente Python, utilizando as bibliotecas GeoPandas, Shapely, NumPy, Pandas e Matplotlib, assegurando reproduzibilidade e consistência métrica das análises.

Análise de Vulnerabilidade do SAG

A pressão urbana sobre o Sistema Aquífero Guarani (Figura 9) foi avaliada por meio de duas abordagens complementares: (i) o cálculo da sobreposição direta da mancha urbana sobre o polígono de afloramento do aquífero; e (ii) a delimitação de zonas de amortecimento (buffers) com raios de 500 m (zona crítica), 1.500 m (zona de alerta) e 3.000 m (zona de observação), a partir do limite do afloramento. Para cada zona, quantificou-se a evolução da área urbanizada ao longo das décadas, permitindo avaliar o grau de pressão indireta exercida pela expansão urbana no entorno imediato da área de recarga. A proporção da expansão urbana incidente sobre o SAG foi calculada em relação à área total de expansão urbana identificada no período analisado.

Ressalta-se que, para essa análise, foram consideradas todas as áreas urbanizadas mapeadas, independentemente de seu tamanho, uma vez que o objetivo consistiu em avaliar a

pressão espacial cumulativa exercida pela urbanização sobre áreas hidrogeologicamente sensíveis, e não apenas a expansão urbana estrutural ou consolidada.

Análise demográfica e espacial

Para investigar a relação entre a expansão da área urbanizada e o crescimento populacional, utilizaram-se os dados oficiais dos Censos Demográficos do IBGE referentes aos anos de 1980, 1991, 2000, 2010 e 2022. Considerando que a série histórica de imagens de satélite (1985–2020) não coincide plenamente com todos os anos censitários, a população correspondente aos anos intercensitários (por exemplo, 1985, 1995, 2005 e 2015) foi estimada por meio de interpolação linear simples entre os anos de referência oficial.

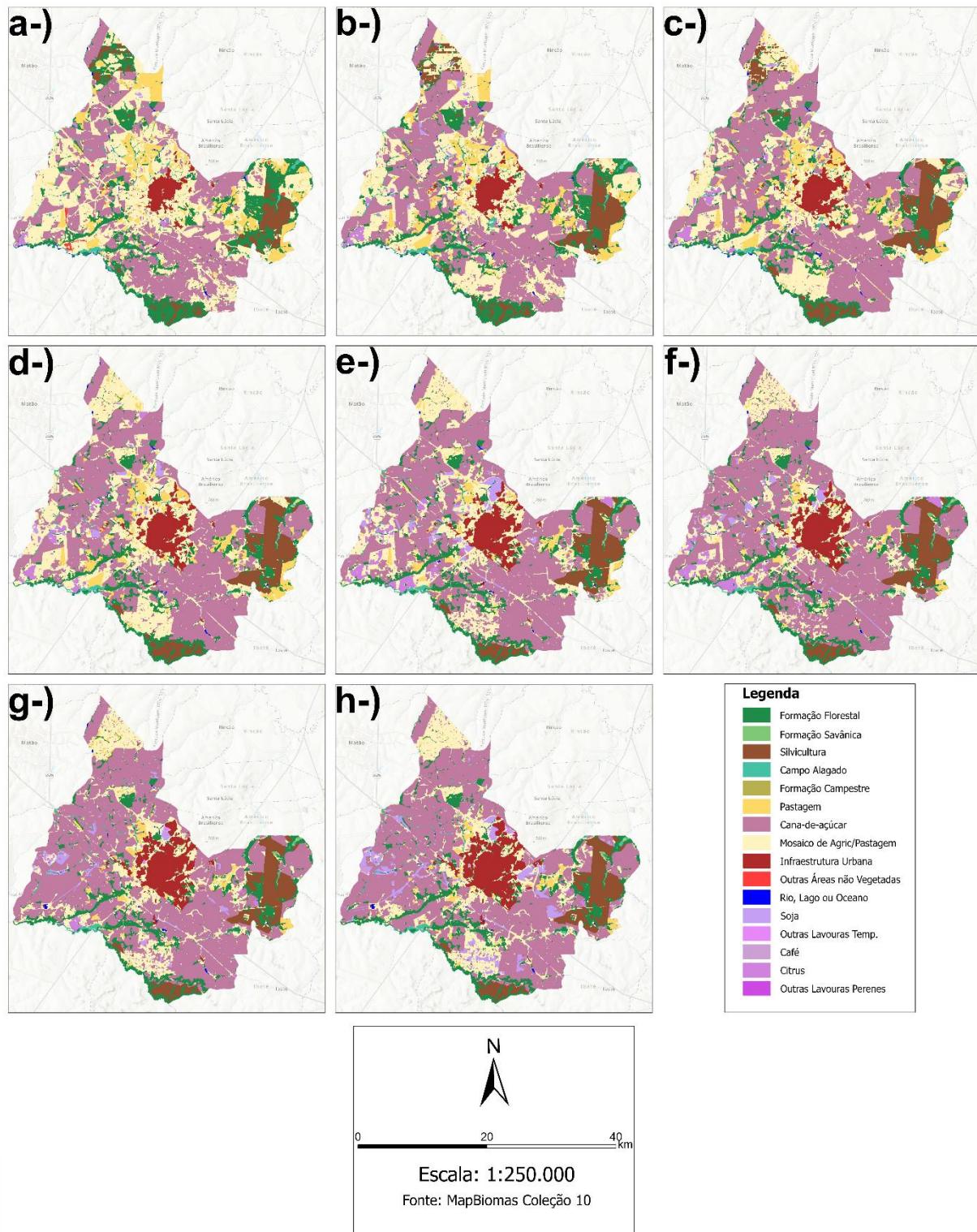
Posteriormente, realizou-se uma regressão linear simples correlacionando a área urbanizada (km^2) e a população estimada. Destaca-se que a interpolação linear da população para anos intercensitários tende a reforçar a linearidade estatística da relação observada; portanto, os resultados devem ser interpretados como indicativos de tendência estrutural de longo prazo, e não como evidência de causalidade estrita entre crescimento populacional e expansão territorial.

Resultados

Evolução espaço-temporal da mancha urbana (1985–2020)

A análise da série histórica do MapBiomas (Coleção 10) permitiu reconstruir a trajetória de ocupação do solo em Araraquara ao longo de 35 anos. A Figura 2 apresenta os mapas de uso e cobertura da terra para os anos de 1985 (a), 1990 (b), 1995 (c), 2000 (d), 2005 (e), 2010 (f), 2015 (g) e 2020 (h). Visualmente, observa-se a consolidação da malha urbana (em vermelho) avançando sobre as áreas de matriz agrícola (em amarelo/creme), predominantemente compostas por mosaicos de uso agropecuário e pastagens.

Figura 2: Mapeamento da dinâmica de uso e cobertura da terra em Araraquara (1985-2020):
 a) 1985; b) 1990; c) 1995; d) 2000; e) 2005; f) 2010; g) 2015; h) 2020



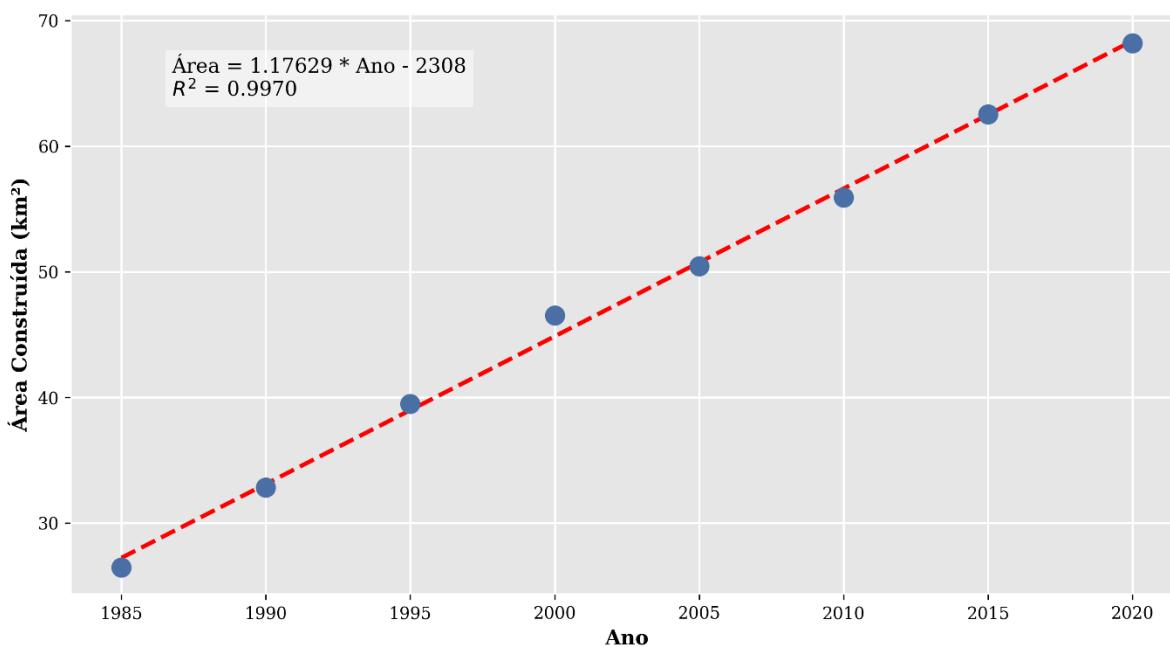
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomass (Coleção 10).

A mancha urbana (vermelho escuro) apresenta expansão radial contínua sobre áreas de pastagem e cultivo. Em termos quantitativos, a área urbanizada de Araraquara saltou de

26,51 km² em 1985 para 68,10 km² em 2020. Esse acréscimo absoluto de 41,59 km² representa um crescimento relativo de 156,9% no período estudado. A regressão linear aplicada à série histórica (Figura 3) revela um coeficiente de determinação extremamente elevado ($R^2 = 0,997$), indicando regularidade no crescimento volumétrico da área urbanizada ao longo das últimas décadas. Cabe ressaltar que a elevada linearidade observada reflete, em parte, a natureza cumulativa da expansão areal e o uso de interpolação populacional nos anos intercensitários, não devendo ser interpretada como evidência de proporcionalidade funcional direta ou de crescimento espacialmente homogêneo. Tal regularidade estatística, entretanto, não implica uniformidade espacial do processo, uma vez que análises direcionais e morfológicas demonstram padrões contrastantes de consolidação contígua e espraiamento fragmentado no território municipal.

Figura 3: Evolução temporal da área construída em Araraquara (1985-2020). A tendência linear aponta para um crescimento constante de 1,17 km² ao ano

Evolução Temporal da Expansão Urbana

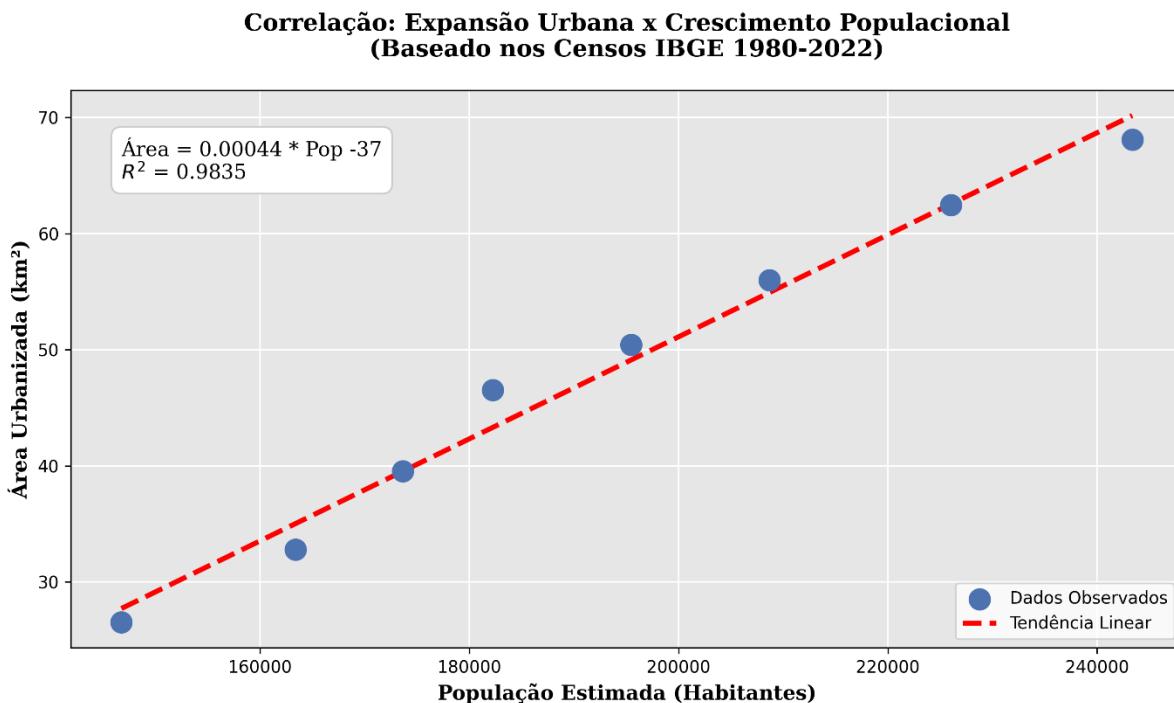


Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomass – Coleção 10.

Correlação com o Crescimento Demográfico

Ao correlacionar a expansão física da cidade com os dados populacionais oficiais dos Censos Demográficos do IBGE (1980, 1991, 2000, 2010 e 2022), observou-se uma relação direta e positiva entre o crescimento demográfico e a ampliação da mancha urbana. O gráfico de dispersão (Figura 4) apresenta elevado coeficiente de determinação ($R^2 = 0,98$), indicando forte associação linear entre as variáveis.

Figura 4: Correlação entre a expansão da área urbanizada e o crescimento populacional (baseado nos Censos IBGE)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do IBGE (1980-2022) e MapBiomas (Coleção 10).

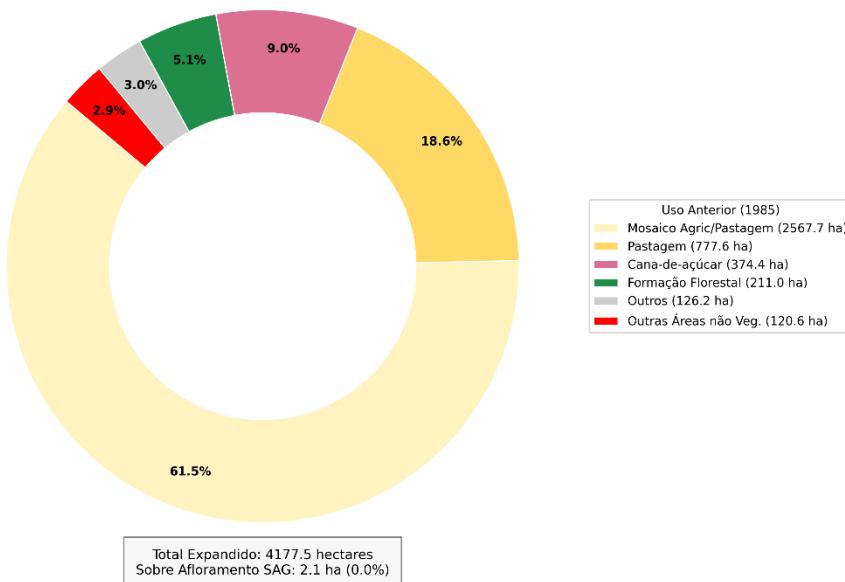
Embora a elevada linearidade estatística não implique, por si só, causalidade exclusiva, os resultados sugerem que a demanda demográfica atua como um dos principais motores da expansão territorial do município. O coeficiente angular da regressão (0,00044) indica que, para cada novo habitante incorporado à população urbana, a área urbanizada tende a se expandir em aproximadamente 440 m² (equivalente a uma densidade marginal de ~22,7 hab/ha). Esse comportamento evidencia um padrão de consumo extensivo do solo, característico de processos de espalhamento urbano horizontal marcados por baixas densidades construtivas e pela predominância de loteamentos residenciais dispersos, alinhando-se à dinâmica de fragmentação do tecido urbano descrita por Ojima (2007) para aglomerações brasileiras.

Caracterização da Expansão: Origem e Direção

A técnica de álgebra de mapas permitiu identificar quais classes de uso do solo foram suprimidas para dar lugar à urbanização. Conforme a Figura 5, 61,5% das novas áreas urbanas consolidaram-se sobre territórios anteriormente classificados como "Mosaico de Agricultura e Pastagem", seguidos por áreas de "Pastagem" (18,6%) e "Cana-de-açúcar" (9,0%). A conversão direta de áreas de Formação Florestal foi baixa (5,1%), indicando que a expansão ocorreu prioritariamente sobre áreas produtivas rurais, e não sobre remanescentes de vegetação densa.

Figura 5: Classes de uso do solo convertidas em área urbana entre 1985 e 2020

Origem das Novas Áreas Urbanas de Araraquara (1985-2020)

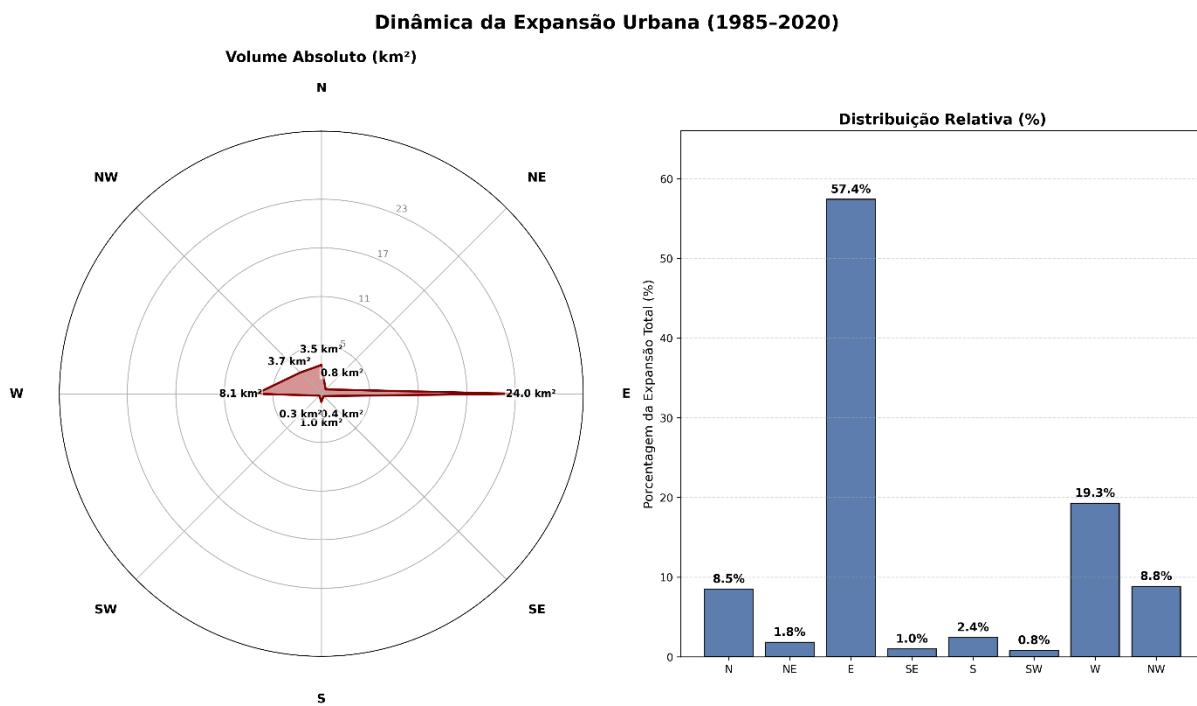


Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomass – Coleção 10.

Quanto à direção do crescimento, a análise vetorial baseada na área efetivamente incorporada ao tecido urbano (Figura 6) indica que 57,4% da expansão consolidada ocorreu em direção à Zona Leste do município, seguida pela Zona Oeste, com 19,3%. Em termos secundários, os vetores Norte (8,5%) e Noroeste (8,8%) apresentam participações intermediárias e relativamente equilibradas, associadas a padrões de ocupação mais fragmentados. Esses resultados evidenciam que, embora o volume principal da expansão urbana esteja concentrado no vetor Leste, existe uma dinâmica relevante de dispersão urbana em direções específicas, distinta da consolidação maciça observada nesse setor.

Essa diferença de escala revela duas lógicas distintas de produção do espaço urbano: enquanto o vetor Leste cresce predominantemente por contiguidade, formando grandes manchas maciças e contínuas, os vetores Norte, Noroeste e Sudeste avançam por pulverização, caracterizada por núcleos menores e dispersos. Portanto, a predominância volumétrica da Zona Leste não deve mascarar a intensa fragmentação periférica em curso nas demais direções, fenômeno que, embora mobilize menor área total, amplia significativamente o perímetro de contato entre a área urbana e rural.

Figura 6: Distribuição direcional da expansão urbana de Araraquara entre 1985 e 2020, expressa em área incorporada (km^2), agregada em oito setores direcionais a partir do núcleo urbano de 1985



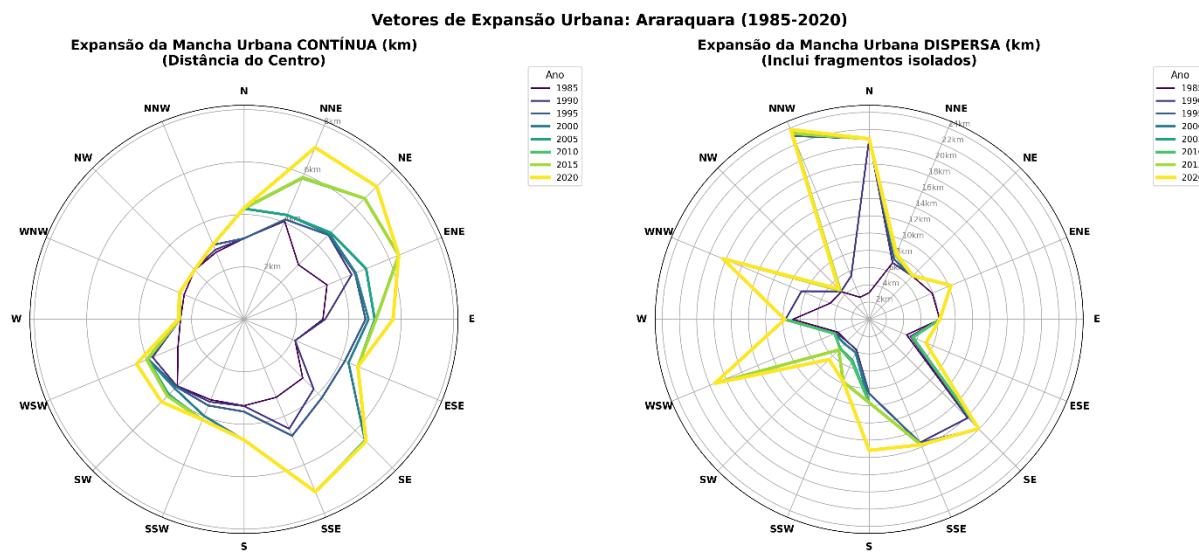
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomass – Coleção 10.

A análise vetorial da expansão urbana entre 1985 e 2020, sintetizada na Figura 6, revela a clara predominância do vetor de crescimento em direção à Zona Leste do município, responsável por aproximadamente 57,4% da área total incorporada ao tecido urbano (24,0 km^2). O vetor Oeste configura-se como a segunda principal direção de crescimento, concentrando 19,3% da expansão total. Em seguida, os vetores Noroeste (8,8%) e Norte (8,5%) apresentam participações intermediárias, associadas a padrões de ocupação mais fragmentados e dispersos. Em contraste, os vetores Sul, Sudeste e Sudoeste possuem expressão espacial reduzida, individualmente inferiores a 3%, reforçando a assimetria direcional do processo de urbanização. A expressividade dos vetores Norte e Noroeste indica uma dinâmica de ocupação baseada em fragmentos menores e descontínuos, contrastando com a consolidação maciça observada no vetor Leste.

Esse padrão evidencia que o crescimento urbano de Araraquara ocorreu de forma espacialmente assimétrica, reforçando um modelo de expansão horizontal direcionada, característico de processos de espraiamento urbano (*urban sprawl*). A concentração da expansão em um setor específico do território indica a atuação combinada de fatores fundiários, infraestrutura viária e da lógica de produção imobiliária, com implicações diretas para o planejamento urbano e a provisão de infraestrutura pública.

Ressalta-se que essa métrica expressa exclusivamente a distribuição direcional da expansão em termos de área incorporada, não captando o alcance espacial máximo nem os padrões de fragmentação linear da urbanização, os quais são analisados por meio da métrica radial apresentada na Figura 7.

Figura 7: Análise radial do alcance máximo da expansão urbana de Araraquara entre 1985 e 2020, expressa como a distância linear máxima (km) entre o núcleo urbano consolidado em 1985 e o ponto urbanizado mais distante em cada um dos 16 setores direcionais, distinguindo-se a mancha urbana contínua da mancha urbana total



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomas – Coleção 10.

A análise radial do alcance espacial da expansão urbana (Figura 7) evidencia assimetrias marcantes entre os diferentes setores direcionais do município. Cabe destacar que essa análise se baseia na distância radial máxima entre o núcleo urbano original e o ponto urbanizado mais distante em cada direção, não representando a densidade, a continuidade ou o volume de área incorporada. Assim, setores com elevados valores de alcance radial podem corresponder a processos de urbanização fragmentada ou dispersa, e não necessariamente a áreas de maior consolidação urbana

Enquanto a análise direcional por área evidencia a predominância do crescimento consolidado no vetor Leste, a métrica radial revela que os maiores alcances espaciais da urbanização ocorrem no vetor Norte, onde fragmentos urbanos isolados ultrapassam 20 km de distância em relação ao núcleo urbano original. Essa discrepância evidencia que diferentes métricas capturam dimensões complementares do processo de expansão urbana: enquanto a análise direcional por área quantifica o volume espacial efetivamente incorporado ao tecido urbano, a métrica radial revela padrões de espraiamento linear, fragmentação e avanço periférico da urbanização no território municipal, compatíveis com a lógica de crescimento desconectado criticada por Pierini e Falcossi (2019) para o caso de Araraquara.

A introdução da métrica de distância radial máxima, aplicada aos eixos cardinais, revela uma dimensão morfológica da expansão urbana que não é captada pela análise baseada exclusivamente no volume de área construída. Enquanto a análise vetorial por área (Figura 6) quantifica quanto a cidade cresceu em cada direção, a métrica radial evidencia até onde a urbanização se projeta no território.

A Figura 7 apresenta dois diagramas comparativos: (i) a mancha urbana contínua, correspondente ao tecido urbano fisicamente conectado ao núcleo original; e (ii) a mancha urbana dispersa, que incorpora fragmentos urbanizados espacialmente desconectados do corpo principal da cidade. Em ambos os casos, a distância radial foi calculada a partir do centro representativo da mancha urbana consolidada em 1985 até o ponto mais distante de urbanização em cada setor direcional.

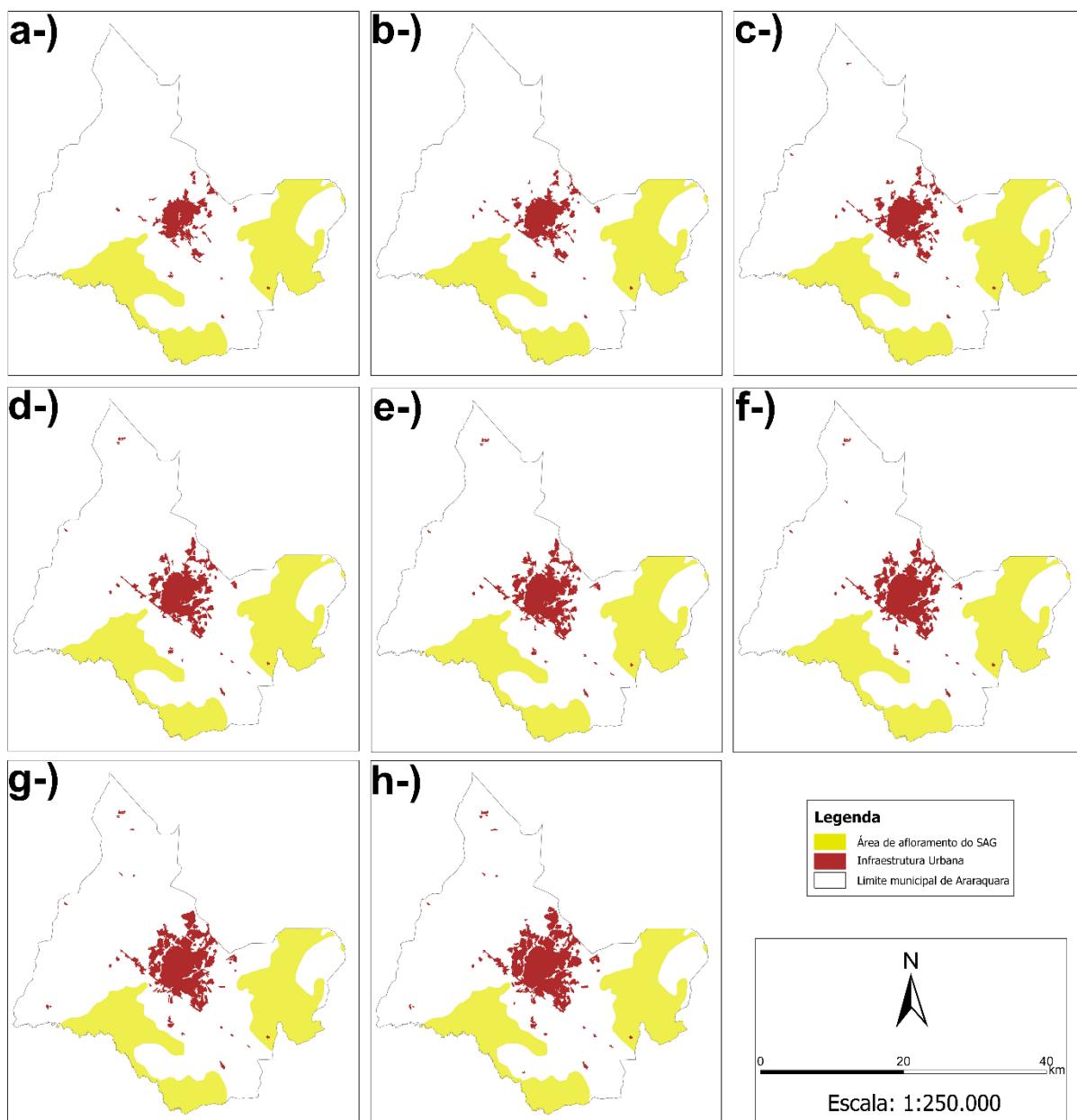
Observa-se que a mancha contínua mantém um padrão relativamente compacto, com raios médios variando entre aproximadamente 6 km e 8 km, indicando que o crescimento contíguo do tecido urbano permaneceu espacialmente limitado. Em contraste, a mancha

dispersa apresenta alcances significativamente superior, sobretudo nos vetores Norte (N, NNE e NNW), nos quais as distâncias máximas ultrapassam 20 km em 2020.

Essa discrepância evidencia que, embora a expansão urbana consolidada ocorra majoritariamente em direção à Zona Leste – conforme indicado pela análise volumétrica –, o processo de urbanização também se manifesta por meio de um espraiamento linear e fragmentado no vetor Norte, caracterizado pela formação de núcleos isolados e ocupações descontínuas. Tal padrão impõe demandas desproporcionais de infraestrutura e serviços urbanos, além de reforçar a lógica de expansão de baixa eficiência territorial.

Do ponto de vista hidrogeológico, o espraiamento urbano fragmentado apresenta impactos que não são captados apenas pelo volume absoluto de área urbanizada. Embora mobilize parcelas relativamente menores de superfície impermeabilizada, sua morfologia dispersa amplia significativamente o perímetro de contato entre usos urbanos e rurais, multiplicando pontos de interação entre sistemas de drenagem urbana, áreas agrícolas e zonas de recarga. Esse aumento do perímetro urbano–rural potencializa o transporte de contaminantes difusos – como efluentes domésticos não tratados, resíduos sólidos e poluentes associados ao tráfego – por meio do escoamento superficial e subsuperficial, configurando um mecanismo indireto, porém persistente, de degradação da qualidade das águas subterrâneas (Foster & Hirata, 1988; Booth & Jackson, 1997). Assim, o risco ao Sistema Aquífero Guarani não decorre exclusivamente da ocupação direta de seu afloramento, mas da expansão fragmentada que intensifica a conectividade hidrológica entre áreas urbanizadas e o meio físico adjacente.

Figura 8: Espacialização da mancha urbana (vermelho) em relação à área de afloramento do SAG (amarelo) em Araraquara (1985-2020): a) 1985; b) 1990; c) 1995; d) 2000; e) 2005; f) 2010; g) 2015; h) 2020



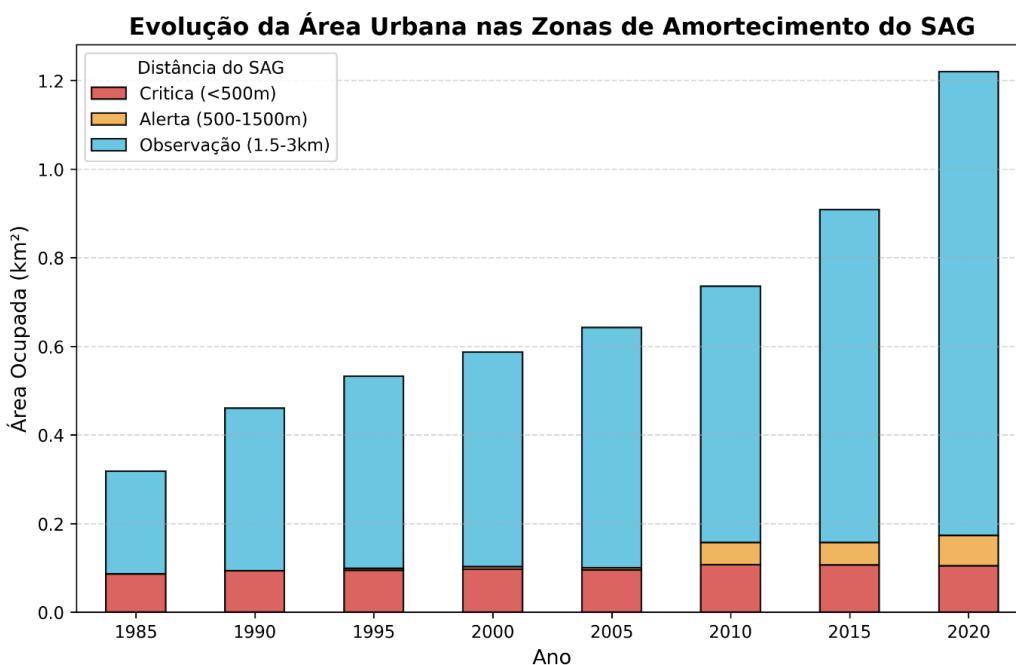
Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomas (Coleção 10) e DAEE (1984).

A espacialização da mancha urbana em relação à área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani, apresentada na Figura 8, permite uma avaliação morfológica direta da relação entre o crescimento urbano e a principal zona de recarga regional. Observa-se que, até o ano de 2020, a ocupação urbana direta sobre o polígono de afloramento permaneceu pontual e espacialmente restrita, indicando que o avanço da malha urbana não se deu prioritariamente por sobreposição física imediata ao aquífero.

No entanto, a leitura espacial evidencia um processo progressivo de aproximação da mancha urbana às bordas do afloramento, configurando um cenário típico de pressão indireta sobre áreas de recarga. Esse padrão é particularmente relevante em aquíferos livres ou

aflorantes, nos quais a vulnerabilidade não está associada apenas à ocupação direta, mas também à proximidade de superfícies impermeabilizadas e de fontes potenciais de poluição difusa no entorno imediato (FOSTER et al., 2002). Assim, a Figura 8 cumpre o papel de evidenciar a configuração espacial do risco, ainda que sua quantificação demande métricas complementares.

Figura 9: Evolução da área urbanizada dentro das zonas de amortecimento (buffers) do Sistema Aquífero Guarani



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomas (Coleção 10) e DAEE (1984).

A quantificação da urbanização nas zonas de amortecimento do Sistema Aquífero Guarani, apresentada na Figura 9, complementa a análise espacial ao explicitar a magnitude da pressão urbana indireta exercida sobre a área de recarga. Os resultados indicam um crescimento expressivo da área urbanizada na faixa compreendida entre 1,5 km e 3,0 km do afloramento (Zona de Observação), que se consolidou como o principal vetor de expansão no entorno do aquífero.

Em contrapartida, a ocupação na Zona Crítica (<500 m) manteve-se praticamente estagnada ao longo do período, demonstrando que a pressão direta sobre a borda imediata foi contida. No entanto, observa-se o surgimento e a consolidação de ocupações na Zona de Alerta (500 m a 1,5 km), especialmente a partir de 2010, sinalizando uma aproximação progressiva da malha urbana em direção às áreas de maior sensibilidade ambiental. Esse comportamento configura um gradiente espacial de pressão hidrogeológica, no qual a urbanização não avança de forma intensiva sobre a área de recarga, mas se densifica em seu entorno imediato, ampliando pressões indiretas e cumulativas sobre o sistema aquífero, conforme discutido por Foster et al. (2002) no contexto da proteção da qualidade das águas subterrâneas.

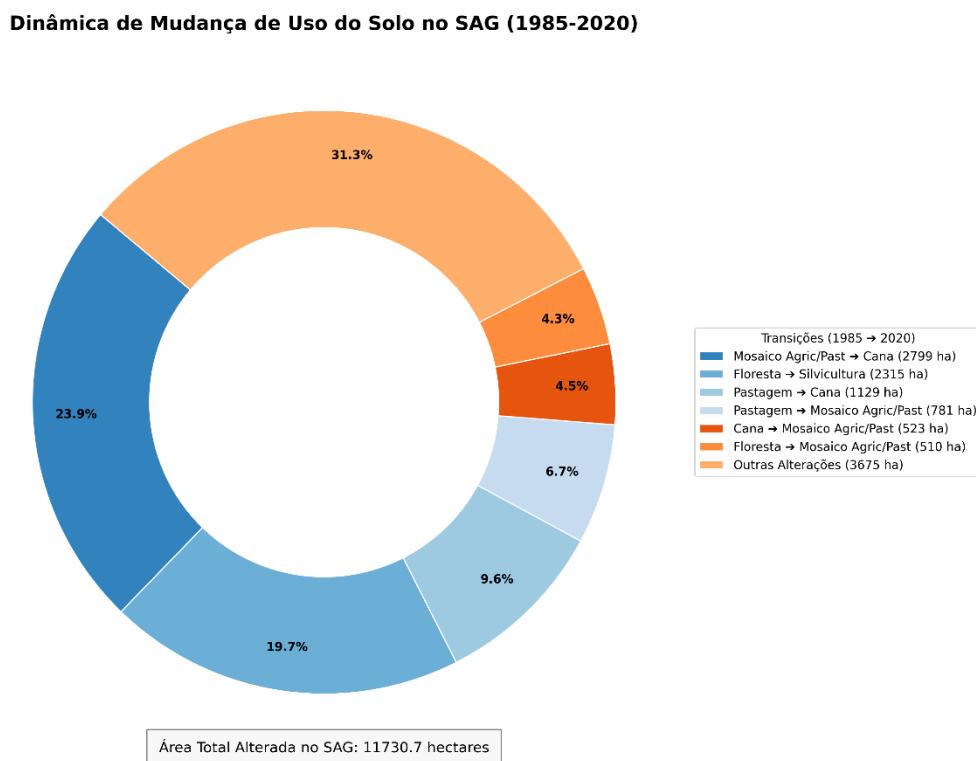
Dessa forma, a Figura 9 evidencia que a vulnerabilidade do SAG em Araraquara não decorre exclusivamente da ocupação direta do afloramento, mas de um processo cumulativo de adensamento urbano nas suas zonas periféricas, reforçando a necessidade de políticas de ordenamento territorial que considerem explicitamente as áreas de amortecimento como componentes estratégicos da proteção hidrogeológica.

Pressão urbana e zonas de amortecimento do Sistema Aquífero Guarani

Além da pressão urbana nas bordas, a área de afloramento do SAG sofreu intensas transformações internas em sua matriz produtiva. A análise de transição exclusiva para o interior do polígono do aquífero (Figura 10) revela que a mudança mais expressiva não foi a urbanização, mas sim a intensificação agrícola.

Observa-se que 2.799 hectares de áreas de Mosaico de Agricultura/Pastagem foram convertidos para Cana-de-açúcar, e outros 2.315 hectares de Formação Florestal foram substituídos por Silvicultura. Essa dinâmica indica que, mesmo onde a mancha urbana não chegou, a vulnerabilidade do aquífero aumentou devido à substituição de usos menos intensivos (pastagem) por monoculturas que demandam maior carga de insumos químicos e fertilizantes, potencializando o risco de contaminação difusa.

Figura 10: Dinâmica de transição de uso do solo restrita à área de afloramento do SAG. Nota-se a forte conversão para culturas temporárias (cana) e silvicultura



Fonte: Elaborado pelos autores (2026), com base em dados do MapBiomas (Coleção 10) e DAEE (1984).

A análise das transições de uso do solo restritas ao interior da área de afloramento revela que a vulnerabilidade do SAG não é estática, mas dinâmica e associada à intensificação produtiva. Conforme detalhado na Figura 10, a mudança mais expressiva no período foi a conversão de 2.799 hectares de 'Mosaico de Agricultura e Pastagem' para 'Cana-de-açúcar', representando 23,9% de todas as alterações mapeadas na área de recarga. Somada à conversão direta de pastagens para cana (1.129 ha), verifica-se uma consolidação da monocultura sucroenergética sobre usos anteriormente menos intensivos.

Outro vetor de transformação relevante foi a substituição de 2.315 hectares de Formação Florestal por Silvicultura (19,7% das mudanças). Essa supressão de vegetação nativa em favor de monoculturas arbóreas plantadas altera o balanço hídrico local e reduz a proteção

natural do solo, conforme amplamente discutido na literatura eco-hidrológica sobre florestas plantadas (Calder, 2007).

Essa reconfiguração da matriz territorial no 'coração' da área de recarga possui implicações hidrogeoquímicas diretas. Diferentemente da urbanização, que impermeabiliza o solo, a expansão da cana-de-açúcar mantém a permeabilidade, mas introduz uma carga química significativa através da aplicação de fertilizantes nitrogenados e vinhaça. Essa prática em zonas de recarga direta potencializa a lixiviação de nitrato e potássio para o aquífero (GOMES et al., 2001; LYRA et al., 2003). Portanto, o cenário de risco em Araraquara é dual: nas bordas, a pressão é física e urbana (impermeabilização); no centro, a pressão é química e agrícola (contaminação difusa).

DISCUSSÃO

A utilização da série histórica do MapBiomas (Coleção 10) permitiu superar limitações recorrentes em estudos anteriores baseados em classificações pontuais e procedimentos manuais, frequentemente restritos a recortes temporais específicos. Embora a resolução espacial dos satélites Landsat seja de 30 metros — o que, em termos teóricos, limitaria a detecção de alvos inferiores a 900 m² —, o processamento em nuvem e a estabilidade temporal dos algoritmos de *Machine Learning* empregados pelo MapBiomas garantiram a detecção consistente de novas áreas periurbanas e de loteamentos em diferentes estágios de consolidação ao longo da série histórica.

Os resultados convergem para a caracterização de um modelo de expansão urbana predominantemente horizontal e ambientalmente oneroso, cuja complexidade só se torna plenamente evidente a partir da integração de métricas volumétricas, direcionais e morfológicas. Embora a regressão temporal da área urbanizada indique um crescimento estatisticamente linear ao longo do período analisado, a distribuição espacial desse crescimento é altamente heterogênea, combinando consolidação contígua em setores específicos do município e processos de espraiamento fragmentado em áreas periurbanas distantes (Figuras 5, 6 e 7). Essa dualidade evidencia que elevados coeficientes de determinação estatística, derivados de métricas temporais agregadas, podem coexistir com padrões espaciais fortemente assimétricos, os quais só se tornam perceptíveis por meio de análises direcionais e morfológicas.

A aplicação de métricas complementares — área incorporada versus alcance espacial — permitiu refinar a compreensão da morfologia urbana de Araraquara. A análise direcional baseada no volume de expansão urbana evidencia a predominância da Zona Leste, responsável por 57,4% da área total incorporada ao tecido urbano, possivelmente associada à disponibilidade de grandes glebas planas favoráveis à implantação de loteamentos residenciais e áreas industriais (Figura 6). Em contraste, a análise radial do alcance máximo da urbanização revela um padrão distinto no vetor Norte, onde a mancha urbana dispersa atinge distâncias superiores a 24 km, enquanto o corpo urbano contínuo não ultrapassa aproximadamente 8 km (Figura 7). Essa distinção demonstra que o espraiamento urbano não constitui um processo homogêneo, mas resulta da sobreposição de dinâmicas simultâneas de consolidação contígua e fragmentação periférica, as quais demandam instrumentos de planejamento territorial diferenciados.

A leitura da direcionalidade da expansão urbana adquire maior relevância quando analisada em conjunto com a configuração hidrogeológica do território municipal. A predominância do vetor Leste, responsável pela maior parcela da área efetivamente incorporada ao tecido urbano, não constitui apenas uma característica morfológica do crescimento de Araraquara, mas possui implicações ambientais específicas, na medida em que esse setor coincide espacialmente com áreas de transição entre a matriz agrícola intensiva e as zonas de amortecimento do Sistema Aquífero Guarani. O avanço urbano nessa direção tende a intensificar processos de impermeabilização do solo, aumentar o escoamento superficial

urbano e reduzir a capacidade de infiltração difusa no entorno das áreas de recarga indireta, ampliando a conectividade entre fontes potenciais de poluição urbana e sistemas hidrogeológicos sensíveis.

Esse padrão permite reinterpretar a literatura local sob uma perspectiva mais nuancada. Enquanto Pierini e Falcossi (2019) identificaram a lógica do espraiamento associada aos eixos de aprovação de loteamentos — frequentemente induzidos no sentido Norte–Sul —, os dados do MapBiomas indicam que esse fenômeno se materializa de forma dual: (i) um espraiamento linear e distante no vetor Norte, corroborando a crítica dos autores quanto à expansão desconexa; e (ii) uma consolidação maciça e contígua no vetor Leste, que promoveu a incorporação contínua de áreas rurais, divergindo parcialmente dos vetores preferenciais do planejamento urbano tradicional.

A morfologia observada no vetor Norte — caracterizada por elevado alcance linear e baixo volume construtivo — materializa espacialmente o conceito de periurbanização e plurifuncionalidade discutido por Vale (2005). As extremidades do gráfico radial de distância correspondem a áreas de ocupação urbana dispersa, típicas da transição rural–urbana, compatíveis com usos como chácaras de recreio, condomínios fechados e outras formas de ocupação difusa, possivelmente favorecidas pela acessibilidade proporcionada pela Rodovia Washington Luís (SP-310) (Figura 7).

Adicionalmente, a orientação espacial da expansão urbana influencia não apenas a proximidade em relação às áreas de vulnerabilidade hidrogeológica, mas também a forma como os fluxos hídricos superficiais e subsuperficiais são reorganizados no território. O avanço urbano ao longo de eixos específicos tende a concentrar sistemas de drenagem, vias pavimentadas e redes de infraestrutura em corredores preferenciais, os quais funcionam como vetores de redistribuição de águas pluviais e potenciais contaminantes. Dessa forma, a direcionalidade da expansão urbana assume papel ativo na mediação entre processos urbanos e hidrogeológicos, condicionando padrões espaciais de risco que não são captados por análises puramente areais (Shuster et al., 2005).

A análise das transições de uso e cobertura da terra confirma que a urbanização de Araraquara não avança de forma significativa sobre áreas de vegetação nativa densa — que representaram apenas 5,1% das conversões —, mas incide majoritariamente sobre áreas produtivas. A supressão de Mosaicos de Agricultura e Pastagem (61,5%) e de Pastagens (18,6%) indica uma competição direta entre usos urbanos e rurais, deslocando a fronteira agrícola para áreas mais distantes ou intensificando o uso do solo remanescente (Figura 4).

A elevada correlação estatística entre o crescimento demográfico e a expansão da área urbana ($R^2 = 0,98$) indica uma associação estrutural de longo prazo entre essas variáveis, devendo, contudo, ser interpretada com cautela. Parte dessa linearidade decorre da natureza cumulativa da expansão areal e da interpolação populacional nos anos intercensitários, não configurando, portanto, evidência de proporcionalidade funcional direta ou causalidade estrita. Ainda assim, os resultados sugerem que a demanda demográfica, combinada a um modelo de ocupação extensivo e de baixa densidade, atua como um dos principais motores da expansão territorial do município, reforçando padrões de crescimento horizontal característicos de processos de espraiamento urbano.

Entretanto, essa linearidade não deve obscurecer mudanças qualitativas no modo de habitar. A redução progressiva do número médio de habitantes por domicílio — de aproximadamente 3,8 em 1991 para 2,79 em 2022 no Brasil (IBGE, 2023) — implica uma demanda crescente por novas unidades habitacionais, mesmo em contextos de desaceleração do crescimento populacional. Tal dinâmica contribui para explicar a manutenção de uma inclinação ascendente relativamente estável da curva de expansão urbana, reforçando padrões de baixa densidade e expansão horizontal.

A relação entre a expansão urbana e o Sistema Aquífero Guarani (SAG) revela-se mais complexa do que a simples ocupação direta da área de afloramento. A sobreposição física direta da mancha urbana sobre o afloramento permaneceu reduzida ao longo do período analisado, totalizando apenas 2,1 hectares (0,05% da expansão total). Considerando a resolução espacial

de 30 metros dos sensores Landsat, esse valor situa-se no limiar de detecção do mapeamento, podendo ser considerado virtualmente nulo para fins de planejamento regional, embora indicativo de vigilância necessária. Em contrapartida, a análise espacial integrada evidencia um adensamento urbano progressivo nas zonas de amortecimento, especialmente nas faixas entre 1,5 km e 3,0 km, bem como o início de ocupações na zona de Alerta (500 m a 1,5 km) (Figuras 8 e 9).

Esse padrão reforça a compreensão de que a vulnerabilidade do Sistema Aquífero Guarani não decorre prioritariamente da ocupação direta da área de afloramento, mas da intensificação de usos no seu entorno imediato, conforme destacado em diretrizes de proteção ambiental para áreas de afloramento no Estado de São Paulo (ALBUQUERQUE FILHO et al., 2012). Estudos hidrogeológicos baseados em métodos geoelétricos indicam que extensas porções da área de afloramento do SAG no Estado de São Paulo apresentam elevada vulnerabilidade natural, associada às características litológicas e à reduzida espessura da zona não saturada (OLIVEIRA BRAGA et al., 2018). Nesse contexto, o adensamento urbano progressivo nas zonas de amortecimento e a intensificação dos usos do solo no entorno imediato tendem a amplificar riscos hidrogeológicos de forma indireta e cumulativa.

Ressalta-se que, embora a análise esteja circunscrita ao limite administrativo do município de Araraquara, os processos hidrogeológicos associados ao Sistema Aquífero Guarani possuem natureza regional, transcendendo fronteiras político-administrativas. Da mesma forma, a dinâmica de expansão urbana periurbana frequentemente se estrutura a partir de eixos viários intermunicipais e de lógicas fundiárias que extrapolam o planejamento local. Assim, os padrões identificados devem ser interpretados como uma aproximação conservadora dos processos em curso, podendo subestimar formas difusas de urbanização e pressão ambiental que se manifestam em escala supramunicipal.

O adensamento urbano na zona de Observação e o avanço inicial da urbanização na zona de Alerta evidenciam um processo de circundamento progressivo das áreas de recarga, configurando um típico efeito de borda hidrogeológico. Nesse contexto, a pressão antrópica não se expressa prioritariamente pela ocupação direta do afloramento geológico, mas pela intensificação de superfícies impermeáveis e de fontes potenciais de poluição em seu entorno imediato, ampliando o risco de contaminação difusa, especialmente por meio do escoamento superficial urbano durante eventos pluviais intensos (STEVENAZZI, 2017).

Configura-se, portanto, um duplo desafio de gestão territorial: no vetor Leste, a pressão decorre da incorporação areal intensiva e contínua de terras agrícolas, associada à expansão urbana consolidada e à aproximação física das zonas de amortecimento do Sistema Aquífero Guarani; no vetor Norte, o desafio assume caráter predominantemente logístico e financeiro, vinculado à maior complexidade da provisão de infraestrutura e serviços públicos em áreas caracterizadas por elevado alcance linear e baixa densidade de ocupação. Esse padrão morfológico amplia o perímetro de contato urbano-rural e favorece a adoção de soluções individuais de saneamento e drenagem, aumentando o potencial de geração e transporte difuso de contaminantes em direção às áreas de recarga indireta. Assim, a vulnerabilidade do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara não resulta de um único vetor de pressão, mas da convergência de processos espacialmente distintos — expansão consolidada e fragmentada — que, em conjunto com a intensificação agroindustrial no interior da área de recarga, configuram um quadro de pressão hidrogeológica cumulativa, demandando abordagens integradas de planejamento territorial e gestão ambiental.

A intensificação agroindustrial identificada no interior da área de recarga do Sistema Aquífero Guarani acrescenta uma dimensão hidrogeoquímica relevante ao cenário de vulnerabilidade observado. A substituição de áreas de pastagem por cultivos intensivos, como a cana-de-açúcar, associada à aplicação de fertilizantes minerais, defensivos agrícolas e resíduos orgânicos, é amplamente reconhecida como fator potencial de aumento do perigo de contaminação das águas subterrâneas em áreas de afloramento do SAG (BARBOSA et al., 2011; FOSTER et al., 2002; CETESB, 2014).

Embora a presente pesquisa não tenha avaliado diretamente parâmetros hidroquímicos, estudos conduzidos em áreas de cana-de-açúcar indicam que as práticas de manejo, como a aplicação de defensivos e a fertirrigação com vinhaça, favorecem o aumento das concentrações de potássio, nitrato e a salinização das águas subterrâneas, além de intensificar processos de lixiviação em solos de elevada permeabilidade (GOMES et al., 2001; LYRA et al., 2003). Nesse contexto, a sobreposição espacial entre a expansão urbana, a atividade agroindustrial e as zonas de recarga reforça o caráter cumulativo da vulnerabilidade hidrogeológica na região, demandando abordagens integradas de gestão territorial.

A partir dos resultados obtidos, torna-se evidente que o risco hidrogeológico associado à expansão urbana não se configura como um evento pontual ou abrupto, mas como um processo cumulativo, construído ao longo do tempo por sucessivas alterações no uso do solo, na morfologia urbana e na conectividade hidrológica do território. Nesse sentido, a análise da dinâmica espaço-temporal da urbanização revela-se fundamental não apenas para identificar áreas de potencial conflito futuro, mas para compreender como decisões históricas de ordenamento territorial condicionam vulnerabilidades ambientais persistentes.

A análise integrada das tendências históricas permite delinear um cenário prospectivo qualitativo para a relação entre a expansão urbana e o Sistema Aquífero Guarani. Mantidas as dinâmicas observadas entre 1985 e 2020 — caracterizadas por crescimento urbano horizontal, adensamento progressivo das zonas de amortecimento e intensificação agroindustrial no interior da área de recarga —, a pressão hidrogeológica tende a se intensificar nas próximas décadas, mesmo na ausência de ocupação urbana direta do afloramento. Ressalta-se que, do ponto de vista hidrogeológico, os impactos sobre a qualidade da água subterrânea frequentemente antecedem o contato físico entre a mancha urbana e a área de recarga, manifestando-se de forma cumulativa por meio do aumento de superfícies impermeáveis, da proximidade entre fontes de poluição difusa e da alteração dos fluxos hidrológicos locais.

Conclusões

O presente estudo, fundamentado na série histórica do MapBiomas (Coleção 10), permitiu uma revisão aprofundada da dinâmica de ocupação do solo em Araraquara, superando estimativas pretéritas baseadas em recortes temporais pontuais. Conclui-se que o processo de urbanização entre 1985 e 2020 foi intenso e acelerado, resultando em um aumento de aproximadamente 157% na área construída, com uma taxa média de expansão de 1,17 km² ao ano. Esse crescimento horizontal expressivo consumiu majoritariamente áreas produtivas, com 61,5% das novas manchas urbanas ocupando antigos Mosaicos de Agricultura e Pastagem.

A elevada correlação estatística ($R^2 = 0,98$) entre o crescimento demográfico e a expansão da mancha urbana indica uma associação estrutural de longo prazo entre essas variáveis, evidenciando a pressão populacional como um dos vetores centrais da urbanização em Araraquara. Contudo, a manutenção de um consumo médio aproximado de 440 m² por habitante demonstra que a forma urbana adotada — marcada pelo espraiamento horizontal — desempenha papel igualmente relevante na dinâmica de expansão, independentemente de variações no ritmo de crescimento populacional.

A análise vetorial da expansão urbana refutou a hipótese de uma ocupação concentrada exclusivamente no eixo Norte–Sul, revelando um forte vetor de crescimento em direção à Zona Leste, responsável por 57,4% da área total incorporada ao tecido urbano. Esse padrão espacial reforça o diagnóstico de *urban sprawl* e evidencia a necessidade de diretrizes específicas de planejamento viário e de infraestrutura capazes de conter a expansão horizontal e induzir maior compacidade do tecido urbano consolidado.

No que se refere à segurança hídrica, os resultados indicam que a vulnerabilidade do Sistema Aquífero Guarani em Araraquara não decorre prioritariamente da ocupação urbana direta sobre sua área de afloramento, mas da convergência de processos indiretos e cumulativos. Destacam-se, externamente, o adensamento progressivo da malha urbana nas

zonas de amortecimento e, internamente, a intensificação agroindustrial no interior da área de recarga. Esse conjunto de dinâmicas evidencia que os riscos hidrogeológicos se constroem de forma gradual, por meio do aumento da conectividade entre superfícies impermeáveis, fontes difusas de poluição e o meio físico de recarga.

Nesse sentido, os resultados demonstram que a expansão urbana de Araraquara, embora apresente forte correlação com o crescimento populacional, é marcada por padrões espaciais específicos de direcionalidade e espraiamento que possuem implicações ambientais distintas. A predominância de vetores de crescimento associados a áreas de transição agroindustrial, aliada à intensificação do perímetro urbano-rural, reforça que os riscos ao Sistema Aquífero Guarani não se limitam à ocupação direta de áreas de recarga, mas à construção gradual de um contexto territorial que favorece a vulnerabilidade hidrogeológica.

Este estudo concentrou-se nas dimensões espaciais, morfológicas e hidrogeológicas da expansão urbana, não incorporando explicitamente variáveis socioeconômicas, topográficas ou modelos preditivos de uso do solo. A inclusão de dados relativos à renda, padrão construtivo, relevo e acessibilidade, bem como a aplicação de modelagens prospectivas baseadas em autômatos celulares ou modelos dinâmicos de expansão urbana, poderia aprofundar a compreensão dos determinantes e cenários futuros da urbanização em Araraquara, constituindo uma agenda relevante para pesquisas subsequentes.

Diante desse cenário, recomenda-se que a revisão do Plano Diretor de Araraquara reforce e explice diretrizes de proteção hidrogeológica, contemplando não apenas a área de afloramento estrito do Sistema Aquífero Guarani, mas também suas zonas de amortecimento imediatas. Tais diretrizes devem priorizar o controle da expansão urbana horizontal — especialmente no vetor Leste —, a indução à maior densificação do tecido urbano consolidado e o monitoramento rigoroso das atividades agroindustriais no interior da zona de recarga. A adoção de uma gestão territorial integrada, que considere simultaneamente os processos urbanos e rurais, mostra-se fundamental para garantir a sustentabilidade do abastecimento hídrico regional e a segurança ambiental a longo prazo.

Referências

ADEYEMI, Adeniyi; RAMOELLO, Abel; CHO, Moses Azong; STRYDOM, Jacobus. Spatio-temporal analysis of built-up impervious surface area and interplay with land surface temperature in Pretoria, South Africa. **Geocarto International**, [S.L.], v. 37, n. 25, p. 7618-7638, 27 set. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10106049.2021.1980617>.

AFONSO, Maria José; FREITAS, Liliana; MARQUES, José Manuel; CARREIRA, Paula M.; PEREIRA, Alcides J.s.C.; ROCHA, Fernando; CHAMINÉ, Helder I.. Urban Groundwater Processes and Anthropogenic Interactions (Porto Region, NW Portugal). **Water**, [S. L.], v. 12, n. 10, p. 2797, 9 out. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w12102797>.

AKIN, Anil; ERDOĞAN, M. Akif. Analysing temporal and spatial urban sprawl change of Bursa city using landscape metrics and remote sensing. **Modeling Earth Systems and Environment**, v. 6, n. 3, p. 1331-1343, 2020.

ALBUQUERQUE FILHO, José Luiz et al. Diretrizes para o desenvolvimento e proteção ambiental da área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani no estado de São Paulo, Brasil. **Boletín Geológico y Minero**, v. 123, n. 3, p. 353-366, 2012.

BARBOSA, Marina Costa; CARVALHO, Ana Maciel; IKEMATSU, Priscila; ALBUQUERQUE FILHO, José Luiz; CAVANI, Ana Cândida Melo. Avaliação do perigo de contaminação do sistema aquífero guarani em sua área de afloramento no estado de São Paulo decorrente das

atividades agrícolas. **Águas Subterrâneas**, [S. L.], v. 25, n. 1, 2011. DOI: 10.14295/ras.v25i1.21296. Acesso em: 29 jan. 2026.

BOOTH, Derek B.; JACKSON, C. Rhett. Urbanization of aquatic systems: degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 5, p. 1077-1090, 1997.

CALDER, Ian R.. Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs. **Forest Ecology And Management**, [S.L.], v. 251, n. 1-2, p. 110-120, out. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015>.

CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Norma Técnica P4.231**: vinhaça – critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola. São Paulo: CETESB, 2014.

CHETTRY, Vishal; SURAWAR, Meenal. Assessment of urban sprawl characteristics in Indian cities using remote sensing: case studies of Patna, Ranchi, and Srinagar. **Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 8, p. 11913-11935, 2021.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO” – UNESP; SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO – SMA. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:250.000. São Paulo: DAEE, Unesp, SMA, 1984.

DEVI, N. Nithila; SRIDHARAN, B.; KUIRY, Soumendra Nath. Impact of urban sprawl on future flooding in Chennai city, India. **Journal of Hydrology**, v. 574, p. 486-496, 2019.

DUARTE, Taíse Ernestina Prestes Nogueira; LEITE, Leandro Bernardo. Cidades médias no Cerrado Brasileiro: desafios para a conservação da biodiversidade. **Terr@ Plural**, v. 14, p. 1-7, 2020.

FOSTER, Stephen S. D.; HIRATA, Ricardo César; ROCHA, Gerônio Albuquerque. RISCOS DE POLUIÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: UMA PROPOSTA METODOLÓGICA DE AVALIAÇÃO REGIONAL. **Águas Subterrâneas**, [S. L.], 1988. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22664>. Acesso em: 29 jan. 2026.

FOSTER, Stephen; HIRATA, Ricardo; GOMES, Daniel; D'ELIA, Monica; PARIS, Marta. Groundwater Quality Protection. **World Bank**, [S. L.], v, 25 out. 2002. The World Bank. <http://dx.doi.org/10.1596/o-8213-4951-1>.

GOMES, M. A. F.; SPADOTTO, C. A.; LANCHOTTE, V. L. Ocorrência do herbicida tebuthiuron na água subterrânea da microbacia do Córrego Espraiado, Ribeirão Preto - SP. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente**, Curitiba, v. 11, n. 1, p. 65-76, 2001.

GORELICK, Noel; HANCHER, Matt; DIXON, Mike; ILYUSHCHENKO, Simon; THAU, David; MOORE, Rebecca. Google Earth Engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote Sensing Of Environment**, [S. L.], v. 202, p. 18-27, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.

HAN, Dongmei; CURRELL, Matthew J.; CAO, Guoliang; HALL, Benjamin. Alterations to groundwater recharge due to anthropogenic landscape change. **Journal Of Hydrology**, [S.

L.], v. 554, p. 545-557, nov. 2017. Elsevier BV.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.018>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse preliminar do censo demográfico 1980**: Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1981. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=283450>. Acesso em: 22 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 1991**: resultados do universo relativos às características da população e dos domicílios. Rio de Janeiro: IBGE, 1994. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=213742>. Acesso em: 22 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2000**: características da população e dos domicílios: resultados do universo. Rio de Janeiro: IBGE, 2000. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=249230>. Acesso em: 22 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sinopse do censo demográfico 2010**: Rio de Janeiro: IBGE, 2011. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/9662-censo-demografico-2010.html?edicao=9673&t=publicacoes>. Acesso em: 22 jan. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo demográfico 2022**: população e domicílios: primeiros resultados. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/administracao-publica-e-participacao-politica/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>. Acesso em: 22 jan. 2026.

MAPBIOMAS. **MapBiomas Project** – Collection 10 of the Annual Land Use and Land Cover Maps of Brazil. Disponível em: <<https://brasil.mapbiomas.org/map/colecao-10/>>. Acesso em: 22 jan. 2025.

ISMAEL, Hemin Mohammed. Urban form study: the sprawling city—review of methods of studying urban sprawl. **GEOJournal**, v. 86, n. 4, p. 1785-1796, 2021.

KOWE, Pedzisai; MUTANGA, Onisimo; DUBE, Timothy. Advancements in the remote sensing of landscape pattern of urban green spaces and vegetation fragmentation. **International Journal of Remote Sensing**, v. 42, n. 10, p. 3797-3832, 2021.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003.

MAN, Wang et al. Spatio-temporal variations in impervious surface patterns during urban expansion in a coastal city: Xiamen, China. **Sustainability**, v. 11, n. 8, p. 2404, 2019.

MOHAN, Manju; SATI, Ankur Prabhat; BHATI, Shweta. Urban sprawl during five decadal period over National Capital Region of India: Impact on urban heat island and thermal comfort. **Urban climate**, v. 33, p. 100647, 2020.

OLIVEIRA BRAGA, Antonio Celso et al. Aplicação da condutância longitudinal na estimativa da vulnerabilidade natural do Sistema Aquífero Guarani no Estado de São Paulo.

Geosciences= Geociências, v. 37, n. 4, p. 807-822, 2018.

OJIMA, R. Dimensões da urbanização dispersa e proposta metodológica para estudos comparativos: uma abordagem socioespacial em aglomerações urbanas brasileiras. **Revista Brasileira de Estudos de População**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 277-300, 2007.

PATEL, L.; GOYAL, S.; THOMAS, T. An assessment of hydrological impacts due to changes in the urban sprawl in Bhopal city and its peripheral urban-rural fringe. In: **Hydrologic Modeling**. Springer, Singapore, 2018. p. 111-122.

PIERINI, Cláudio Robert; FALCOSKI, Luiz Antonio Nigro. A evolução urbana do município de Araraquara (SP): uma crítica ao espraiamento. **INOVAÇÃO FILOSÓFICA E DESENVOLVIMENTO SOCIAL**: perspectivas / Perspectivas do Desenvolvimento Regional, v. 9, n. 26, p. 174-196. 2019.

SHUSTER, W. D.; BONTA, J.; THURSTON, H.; WARNEMUENDE, E.; SMITH, D. R.. Impacts of impervious surface on watershed hydrology: a review. **Urban Water Journal**, [S. L.], v. 2, n. 4, p. 263-275, dez. 2005. Informa UK Limited.
<http://dx.doi.org/10.1080/15730620500386529>.

SILVA, Júlio César Tavares de Paiva; SATHLER, Douglas; MACEDO, Diego Rodrigues. Morfologia urbana e crescimento periférico nas cidades médias brasileiras: geotecnologias e inovações metodológicas aplicadas a Montes Claros, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 39, 2022.

SOUZA, Carlos M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, n. 17, p. 2735, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2735>.

STEVENAZZI, Stefania. Time-dependent methods to evaluate the effects of urban sprawl on groundwater quality: a synthesis. **Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater**, v. 6, n. 4, 2017.

VALE, Ana Rute do. **Expansão urbana e plurifuncionalidade no espaço periurbano do município de Araraquara (SP)**. 2005. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.

WIJERATNE, V. P. I. S.; LI, Gang. Urban sprawl and its stress on the risk of extreme hydrological events (EHEs) in the Kelani River basin, Sri Lanka. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 68, p. 102715, 2022.

WORLD BANK. **World Bank Database**. Disponível em: <http://data.worldbank.org>. Acesso em: 15 jan. 2023).

Recebido em: 24/03/2025.
Aprovado para publicação em: 29/12/2025.