

Compacidade-espraiamento e padrões de crescimento urbano: abordagem por métricas espaciais

Compactness-sprawl and urban growth patterns: a spatial metrics approach

Ivan Damasco Menzori 

Luciana Márcia Gonçalves 

Resumo

A expansão desordenada das cidades é um desafio global que afeta o desenvolvimento urbano. Neste estudo, é analisado o crescimento urbano em uma cidade média durante cinco décadas, com enfoque na forma urbana e aplicação de mais de 20 métricas espaciais associadas à mensuração da geometria da expansão físico-territorial no ambiente construído. Os padrões de crescimento são analisados à luz do fenômeno espraiamento urbano e sob a perspectiva da teoria de Difusão-Coalescência. São discutidas as limitações inerentes às métricas existentes, assim como elencadas alternativas que as superam por mensuração das propriedades de Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão concomitantemente. Os resultados demonstraram a ocorrência de fases distintas no crescimento urbano ao longo das décadas: Difusão de uma forma inicialmente compacta em partes menores nas periferias; e Transição para crescimento com agrupamento dessas partes, elevando a compacidade. Essa oscilação sugere aderência à teoria da Difusão-Coalescência, com ocorrência de espraiamento urbano (entre 1966 e 1976) seguida de aumento da compacidade nas décadas subsequentes (1976–2006). Após 2006 os resultados são ambíguos, possivelmente associados a fatores intervenientes de planejamento. A discussão dos resultados destaca a relevância da quantificação do crescimento urbano por meio de métricas, e traz conceitos importantes atualmente limitados à literatura internacional.

Palavras-chave: Métricas espaciais. Crescimento urbano. Espraiamento urbano. Difusão-coalescência.

Abstract

The disorderly expansion of cities is a global challenge that impacts urban development. In this paper, we analyse the urban growth in a medium-sized city over five decades, focusing on urban form and employing more than 20 spatial metrics associated with the geometry of physical-territorial expansion in the built environment. We examine the growth patterns in the context of the urban sprawl phenomenon and the Diffusion-Coalescence theory perspective. We discuss the inherent limitations of existing metrics and raise alternatives that simultaneously address the properties of Compactness, Fragmentation, Complexity, and Dispersion. The results reveal distinct phases in urban growth over the decades, from diffusion of an initially compact form into smaller parts on the periphery; to a transition towards more compact growth. This oscillation suggests adherence to the Diffusion-Coalescence theory, with urban sprawl occurring between 1966 and 1976, followed by increased compactness in subsequent decades (1976–2006). After 2006, the results became ambiguous, possibly due to intervening planning factors. The discussion of the findings underscores the importance of quantifying urban growth using metrics and introduces concepts that have been hitherto limited to international literature.

¹Ivan Damasco Menzori

¹Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

²Luciana Márcia Gonçalves

²Universidade Federal de São Carlos
São Carlos - SP - Brasil

Recebido em 06/07/23

Aceito em 24/11/23

Keywords: Spatial metrics. Urban growth. Urban sprawl. Coalescence-diffusion.

Introdução

Atualmente, mais da metade da população mundial vive em cidades e, nas últimas décadas, foram observados declínios nas densidades urbanas, com a expansão territorial superando o crescimento populacional. Estudos realizados em centenas de cidades do mundo evidenciam um predomínio de expansão físico-territorial com menores densidades populacionais (Seto; Guneralp; Hutyra, 2012; Mahtta; Mahendra; Seto, 2019; Chakraborty *et al.*, 2022a; Novotný; Chakraborty; Maity, 2022), mais intenso em cidades de países menos desenvolvidos, onde a população urbana dobrou entre 1990 e 2015, mas suas áreas urbanizadas se expandiram na proporção de 3,5 vezes (Angel *et al.*, 2016).

O termo espraiamento urbano (*urban sprawl*) é frequentemente empregado na descrição desse fenômeno – embora ambíguo, sem consenso e definição universal (Chetry, 2023) –, sendo associado a baixas densidades populacionais e expansão urbana difusa. Via de regra, esses processos exigem maiores extensões de solo cultivável ou natural (Novotný; Chakraborty; Maity, 2022), à medida que a infraestrutura preexistente permanece subutilizada, resultando em maior consumo de combustíveis fósseis, emissão de gases de efeito estufa e aumento da poluição do ar (Ewing, 2008; Frenkel; Ashkenazi, 2008; Mahendra; Seto, 2019), degradação e poluição do solo (Güneralp; Perlstein; Seto, 2015; Güneralp *et al.*, 2020) e degeneração das funções ecossistêmicas (Jaeger *et al.*, 2010; Jia *et al.*, 2020), impulsionando as mudanças climáticas globais (Oke, 1989; Rockström *et al.*, 2009; Gunawardena; Wells; Kershaw, 2017).

Por outro lado, um modelo de crescimento urbano mais compacto, que prioriza o preenchimento de vazios urbanos (conhecido como *infill*), pode ajudar a mitigar a conversão de áreas naturais ou seminaturais em áreas urbanizadas, aproveitando melhor o espaço urbano disponível (Güneralp *et al.*, 2020; Chakraborty *et al.*, 2022a, 2022b). Quando planejada adequadamente, uma cidade mais compacta pode reduzir a dependência do transporte individual motorizado, favorecendo o uso do transporte público e dos modos ativos na mobilidade urbana (Souza *et al.*, 2020).

No entanto, apesar da importância dos temas compactidade e espraiamento urbano, análises quantitativas detalhadas sobre a geometria da forma urbana ainda são escassas. Métodos quantitativos de classificação ou análise da configuração urbana surgiram mais recentemente, representados por métricas espaciais que descrevem características físicas da paisagem urbana (Huang; Lu; Sellers, 2007). Nesse contexto, “configuração urbana” refere-se à geometria e à composição do ambiente urbano construído, incluindo suas características físico-territoriais e heterogeneidade – em que espraiamento urbano é associado a formas complexas, dispersas, fragmentadas e menos compactas, bem como a usos do solo segregados e homogêneos (Frenkel; Ashkenazi, 2008).

Neste estudo, foram utilizadas métricas espaciais disponíveis na literatura e compatíveis com dados espaciais vetoriais, com foco na Compactidade como uma propriedade geométrica relacionada a outras três: Fragmentação, Complexidade e Dispersão. Essas métricas foram aplicadas a cenários representativos do crescimento físico-territorial urbano observado em uma cidade de porte médio do interior paulista (Araraquara), ao longo de aproximadamente cinco décadas. Os resultados foram organizados por propriedade geométrica analisada, com o objetivo de identificar tendências e relações significativas, buscando distinguir a incidência do fenômeno do espraiamento urbano¹.

Não obstante as motivações inerentes ao espraiamento urbano, que podem ser sociais, econômicas, de governança e planejamento, etc. (Chetry, 2023) – excedendo o escopo deste estudo –, a aplicação de métricas espaciais oferece potencial para caracterizar esse fenômeno. Pode, também, auxiliar na compreensão da teoria de Difusão-Coalescência de Dietzel *et al.* (2005). Essa teoria descreve dois processos cíclicos no crescimento urbano:

- (a) o crescimento de uma mancha urbana inicialmente compacta por meio da difusão de manchas secundárias ou pela criação de novas centralidades urbanas mais afastadas; e
- (b) paralelamente a esse processo de difusão, ocorre o crescimento orgânico no entorno das manchas secundárias ou das centralidades mais afastadas, resultando em seu adensamento e preenchimento de vazios urbanos (coalescência) e, por fim, em um ambiente urbano construído mais compacto.

¹Nesse sentido, Araraquara é um objeto de estudo relevante pois já foi demonstrado em pesquisas anteriores que a cidade passou por uma transição de padrões mais compactos para formas urbanas mais espraiadas no decorrer de seu crescimento urbano (Peres, 2012; Gonçalves, 2022). Todavia, o uso de métricas espaciais como indicadores, nesta cidade, ainda não foi realizado com o aprofundamento aqui proposto.

Deste modo, as análises aqui alçadas – escassas e geralmente restritas, principalmente, à literatura internacional – são uma contribuição relevante, pois os próprios autores dessa teoria reconhecem a importância de testá-la em outros contextos.

Configurações urbanas e métricas espaciais

Segundo Herold, Goldstein e Clarke (2003), assim como Aguilera, Valenzuela e Botequilha-Leitão (2011), o termo “métrica da paisagem” é explicitamente relacionado a funções ecológicas, à medida que o termo “métrica espacial” está mais associado à caracterização de formas urbanas, inclusive por meio da aplicação de métricas da paisagem. As métricas espaciais são medidas quantitativas e agregadas, derivadas de análises de mapas temáticos categóricos, que representam a heterogeneidade espacial em uma escala específica, e proporcionam um resumo descritivo das partes constituintes e características do ambiente urbano construído (Herold; Goldstein; Clarke, 2003).

Baseadas nas propriedades geométricas de Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão, e aplicáveis às múltiplas partes que compõem o ambiente construído, as métricas espaciais são ferramentas úteis para mensuração dos processos de crescimento urbano, e muito relevantes para planejadores que buscam melhor compreender e caracterizar esses processos e suas consequências (Aguilera; Valenzuela; Botequilha-Leitão, 2011; Sun *et al.*, 2013), além de descrever quantitativamente a configuração urbana em relação a propriedades espaciais inerentes à manifestação do fenômeno espraiamento urbano.

Compacidade representa uma das propriedades mais importantes de uma forma (Angel; Parent; Civco, 2010; Li; Goodchild; Church, 2013). Na geometria, a forma de um círculo é usada como referência, pois é considerada a mais compacta possível. A compacidade geométrica pode ser definida como uma medida que indica o quão diferente uma forma é em relação a um círculo perfeito. Duas abordagens principais (Wirth, 2004) são usadas para analisar e classificar formas:

- (a) convexidade: essa abordagem avalia o quão irregular é o perímetro de uma forma em comparação com uma forma convexa. Uma forma convexa é aquela em que qualquer par de pontos dentro dela possui uma linha reta que está contida na forma. Convexidade considera as irregularidades do perímetro; e
- (b) circularidade: a circularidade quantifica o quão similar uma forma é a um círculo perfeito, considerando a diferença relativa entre a forma e sua região convexa delimitada por um Menor Círculo Envolvente (MEC). Circularidade não considera as irregularidades do perímetro.

Assim, formas mais irregulares (Complexidade) ou com presença de vazios intersticiais (porosas), são consideradas menos compactas. A mesma lógica pode ser aplicada para formas compostas por múltiplas partes (Fragmentação), em que a relação entre os somatórios dos perímetros de partes diversas, ou a ocorrências de espaços vazios entre estes fragmentos (Dispersão), implicam menores valores de Compacidade, como mostrado na Figura 1.

Fragmentação representa a divisão de uma classe em várias partes (Malinverni, 2011). Em um contexto de crescimento urbano, fragmentação retrata o grau de desagregação das partes constituintes. Isso se manifesta por meio de manchas urbanas imbricadas a usos não-urbanos do solo (Schneider; Woodcock, 2008), como áreas naturais, cultiváveis e agropastoris, por exemplo.

Complexidade descreve a irregularidade da forma de uma mancha urbana (Huang; Lu; Sellers, 2007), por meio de relações entre área e perímetro (Malinverni, 2011). Além disso, duas formas podem ter diferentes graus de fragmentação e complexidade (Saura; Carballal, 2004). Na Figura 2 são ilustradas duas formas, sendo a da esquerda mais fragmentada e menos complexa; e a da direita mais complexa, porém menos fragmentada.

Dispersão representa o distanciamento entre as múltiplas partes que compõem o ambiente urbano construído, e descreve a proximidade entre as manchas secundárias e a mancha principal (geralmente o núcleo urbanizado) ao nível do ambiente urbano construído como um todo – escala macro (Schneider; Woodcock, 2008). Na Figura 3 são ilustrados diferentes níveis de dispersão.

Considerando que os padrões de crescimento físico-territorial associados ao espraiamento urbano envolvem aumentos na Dispersão, Fragmentação (aumento de partes/manchas urbanas mais periféricas) e Complexidade (agrupamentos de forma não-contígua, especialmente nas periferias), impactando diretamente nas medidas de Compacidade (formas que pouco se assemelham ao círculo), a aplicação de métricas espaciais relacionadas a essas propriedades geométricas pode contribuir para identificar esse fenômeno. Além disso, essas análises

podem ser relevantes à luz da teoria² da Difusão-Coalescência de Dietzel *et al.* (2005), que propõe uma perspectiva única sobre padrões de crescimento físico envolvendo fases oscilatórias de expansão e agrupamento ao longo do tempo – representando, assim, uma abordagem que vai além do discurso tradicional de espraiamento urbano.

Para quantificar aspectos relacionados à Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão do crescimento³ urbano a partir de dados espaciais vetoriais, foram selecionadas métricas espaciais explícitas (que descrevem resultados diretamente a partir das formas analisadas) e agregadas (que integram múltiplas partes das formas), amplamente reconhecidas na literatura acadêmica (Reis; Silva; Pinho, 2015). Algumas métricas não-explícitas, como Densidade Populacional Urbana (DU), Desvio Padrão (PSSD) e Coeficiente de Variação (PSCOV) de Manchas urbanas, também podem ser relevantes, pois descrevem aspectos importantes (Herold; Couclelis; Clarke, 2005). O Quadro 1 apresenta as métricas espaciais selecionadas, suas equações, variáveis, propriedades geométricas, descrições e referências relevantes na literatura acadêmica.

A mensuração das propriedades de Fragmentação, Complexidade, Dispersão e Compacidade raramente ocorre simultaneamente por meio de métricas. Embora existam vários métodos disponíveis na literatura, eles geralmente se limitam a métricas que analisam parcialmente essas propriedades geométricas. Nesse contexto, Chettry (2023) enfatiza a necessidade de aplicar múltiplas métricas correlacionadas para análises espaço-temporais de crescimento urbano, devido às complexidades inerentes às mudanças na ocupação do solo. Além disso, conforme demonstrado por Menzori (2021), diferentes métricas (explícitas e agregadas, inclusive) têm limitações distintas na descrição das quatro propriedades geométricas.

Por exemplo, métricas como o Índice de Compacidade (CI), Relação de Compacidade (CR) e Coeficiente Isoperimétrico (IPQ), não consideram a Dispersão, resultando em descrições idênticas para formas multipartes semelhantes, mas com diferentes graus de afastamento entre os fragmentos. Da mesma forma, métricas como Compacidade e Circularidade (CCM) e Compacidade Digital (DCM) não abordam as propriedades de Complexidade e Fragmentação. Isso ressalta limitações nas abordagens tradicionais de mensuração de Compacidade, que podem ter sido superadas pelas métricas M1, M2 e M3 propostas por Menzori (2021) e aplicadas neste estudo conforme Menzori (2024, p. 1), as quais consideram de maneira mais abrangente essas propriedades geométricas e representam contribuições relevantes.

Figura 1 - Exemplos da descrição de compacidade

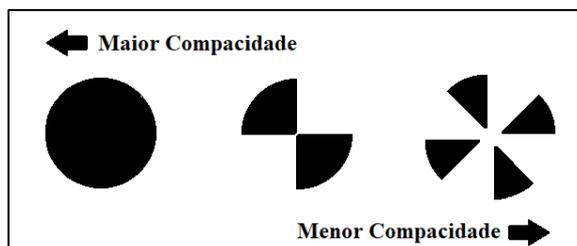
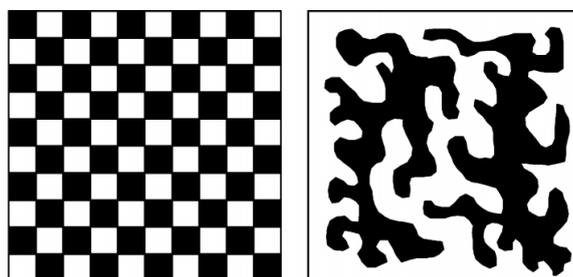


Figura 2 - Exemplos de Fragmentação e Complexidade

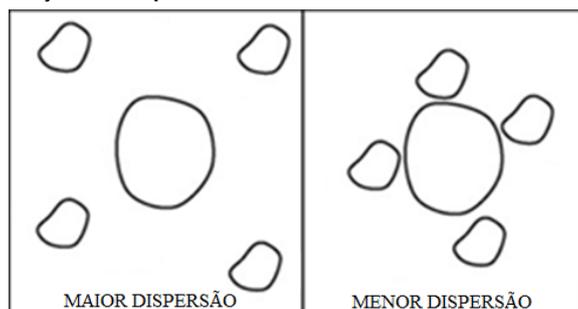


Fonte: Saura e Carballal (2004, p. 659).

²Inicialmente proposta a partir de quatro métricas da paisagem e aprofundadas para doze métricas espaciais, aplicadas sobre dados matriciais. Das doze métricas utilizadas por Dietzel *et al.* (2005), apenas três não foram utilizadas neste estudo, em função da utilização de dados vetoriais (ao invés de matriciais) e suas especificidades inerentes.

³Neste estudo, as análises de crescimento urbano se concentram na geometria do crescimento físico-territorial, sem considerar os aspectos econômicos, sociais, ambientais, etc.

Figura 3 - Exemplos de descrição da dispersão



Fonte: adaptado de Huang, Lu e Sellers (2007, p. 187).

Quadro 1 - Métricas espaciais adotadas (Continua...)

ID	Métrica	Escala	Equação	Variáveis	Descrição e Referências
DU	Densidade urbana	Mancha total	$\frac{Pop.}{A}$	Pop = população urbana; A = área total da mancha urbana	Representa o número de habitantes por área urbanizada, na qualidade de indicador de densidade urbana. Referências: Huang, Lu e Sellers (2007); Braga (2016) e Sousa, Menzori e Braga (2021).
NP	Número de manchas	Mancha total	$1 + \sum_{j=0}^n nij$	nij = número de manchas secundárias	Indicadores muito utilizados em métricas da paisagem. No ambiente construído, quantificam a fragmentação por meio do número de partes (NP) e o tamanho médio das partes (MPS) que compõem o ambiente construído. Aumentos no NP indicam maior fragmentação, e reduções em MPS maior agregação, e vice-versa. Referências: Herold, Couclelis e Clarke (2005); Schneider, Seto e Webster (2005); Seto e Fragkias (2005); Hahs e McDonnel (2006); Irwin e Bockstael (2007); Yu e Ng (2007); Weng (2007); Frenkel e Ashkenazi (2008); Silva, Ahern e Wileden (2008); Torrens (2008); Deng <i>et al.</i> (2009); Huang e Luo (2009); Schwartz (2010); Aguilera, Valenzuela e Botequilha-Leitão (2011); Pham, Yamaguchi e Bui (2011); Wu <i>et al.</i> (2011) e Sun <i>et al.</i> (2013).
MPS	Tamanho médio de manchas	Manchas secundárias	$\frac{\sum_{j=1}^n aij}{nij}$ $\frac{A}{A}$	aij = área de mancha secundária; nij = número de manchas secundárias; A = área total da mancha urbana	
PSSD	Desvio padrão de manchas	Manchas secundárias	$\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n [aij - \frac{\sum_{j=1}^n aij}{nij}]^2}{nij}}$	aij = área de mancha secundária; nij = número de manchas secundárias	Medidas indiretas (não-explícitas) que descrevem as diferenças relativas entre os tamanhos das partes (manchas) secundárias no ambiente construído. Menores valores PSSD indicam uma distribuição mais homogênea (zero = todas as partes de mesmo tamanho). Já PSCOV indica o mesmo, mas corresponde a PSSD normalizado por MPS. Referências: Herold, Scepán e Clarke (2002); Herold, Couclelis e Clarke (2005); Seto e Fragkias (2005) e Schwartz (2010).
PSCOV	Coefficiente de variação de manchas	Manchas secundárias	$\frac{PSSD}{MPS}$		
PD	Densidade de mancha	Mancha total	$\frac{nij}{A}$	nij = número de manchas secundárias; A = área total da mancha urbana	Medida de heterogeneidade da paisagem similar ao NP, porém normalizado pela área total. Maiores valores indicam maior fragmentação, e vice-versa. Referências: Herold, Scepán e Clarke (2002); Herold, Couclelis e Clarke (2005); Ji <i>et al.</i> (2006); Irwin e Bockstael (2007); Weng (2007); Schneider e Woodcock (2008); Deng <i>et al.</i> (2009); Wu <i>et al.</i> (2011); Sun <i>et al.</i> (2013).

Quadro 1 - Métricas espaciais adotadas (continuação)

ID	Métrica	Escala	Equação	Variáveis	Descrição e Referências
LPI	Índice de mancha principal	Mancha total	$\frac{\max(ai)j}{A}$	$\max(ai)j$ = tamanho da mancha principal; A = área total da mancha urbana	Métrica da paisagem, que no contexto urbano descreve a relação entre a área da maior parte (a mancha urbana principal) e a área total do ambiente construído. Referências: Herold, Goldstein e Clarke (2003); Hahs e McDonnell (2006); Yu e Ng (2007); Schetke e Haase (2008); Deng <i>et al.</i> (2009); Huang e Luo (2009) e Pham, Yamaguchi e Bui (2011).
FD	Dimensão fractal	Mancha total	$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{2 \ln(0.25pi)}{\ln ai}}{NP}$	pi = perímetro da mancha i ; ai = área da mancha i	Métricas da paisagem muito utilizadas. No ambiente construído, FD descreve os graus de Complexidade e Fragmentação a partir das áreas e perímetros das partes (manchas urbanas), em que menores valores indicam Fragmentação e Complexidade menores (sendo $FD = 1$ para a figura de um quadrado). Já AWMPFD é similar a FD, porém limitada às manchas secundárias e ponderada por área. Referências: Herold, Spacen e Clarke (2002); Herold, Goldstein e Clarke (2003); Herold, Couclelis e Clarke (2005); Seto e Fragkias (2005); Hahs e McDonnell (2006); Huang, Lu e Sellers (2007); Yu e Ng (2007); Frenkel e Ashkenazi (2008); Huang e Luo (2009); Schwartz (2010); Pham, Yamaguchi e Bui (2011) e Wu <i>et al.</i> (2011).
AWMPFD	Dimensão fractal ponderada	Manchas secundárias	$\frac{\sum_{i=1}^n \frac{2 \ln(0.25pij)}{\ln aij}}{nij} * \frac{aij}{\sum_{i=1}^n aij}$	pij = perímetro de mancha secundária; aij = área de mancha secundária; nij = número de manchas secundárias	
LSI	Índice de forma da paisagem	Mancha total	$\frac{\sum_{i=1}^n pi}{2\sqrt{\pi} \sqrt{\sum_{i=1}^n ai}}$	pi = perímetro da mancha i ; ai = área da mancha i	Medidas de Complexidade e Fragmentação do ambiente construído a partir de relações entre perímetro e área das manchas urbanas. LSI descreve a Fragmentação da mancha urbana total, em que menores valores indicam menor Fragmentação (sendo $LSI = 1$ para a figura de um círculo, menor valor possível). Similarmente, SI e AWMSI descrevem a Complexidade, porém limitadas às manchas secundárias (AWMSI) e à mancha urbana principal (SI). Referências: Saura e Carballal (2004); Huang, Lu e Sellers (2007); Yu e Ng (2007); Frenkel e Ashkenazi (2008) e Schwartz (2010).
SI	Índice de forma	Mancha principal	$\frac{pi}{2\sqrt{\pi} \cdot ai}$	pi = perímetro da mancha i ; ai = área da mancha i	
AWMSI	Índice de forma ponderado	Manchas secundárias	$\frac{\sum_{j=1}^n SI \cdot ai}{\sum ai}$	ai = área da mancha i	
MSI a	Índice de forma médio	Mancha total	$\frac{\sum_{j=1}^n pi / (2\pi \sqrt{\frac{ai}{\pi}})}{ni}$	pi = perímetro da mancha i ; ai = área da mancha i ; ni = número de manchas i	Métrica da paisagem, aplicada com distinção entre mancha principal e manchas secundárias. Descreve Complexidade a partir da relação entre o perímetro “ pi ” de uma dada mancha de área “ ai ”, e o perímetro de um círculo de área “ ai ”, normalizada pelo número de partes. Quanto menor o valor de MSI, menor a Complexidade (sendo $MSI = 1$ o menor valor possível). Referência: Aguilera, Valenzuela e Botequilha-Leitão (2011).
MSIb	Índice de forma médio	Manchas secundárias			
ED	Densidade de borda	Mancha total	$\frac{\sum pi}{A}$	A = área total da mancha urbana; pi = perímetro da mancha i	Métrica da paisagem, que descreve a Complexidade a partir da relação entre perímetro e área. Maiores valores indicam maior Complexidade, e vice-versa. Referências: Herold, Scepán e Clarke (2002); Herold, Goldstein e Clarke (2003); Seto e Fragkias (2005); Deng <i>et al.</i> (2009); Huang e Luo (2009); Pham, Yamaguchi e Bui (2011) e Wu <i>et al.</i> (2011).

Quadro 1 - Métricas espaciais adotadas (continuação)

ID	Métrica	Escala	Equação	Variáveis	Descrição e Referências
CIa	Índice de compacidade de	Mancha total	$\frac{\sum_{i=1}^n 2\pi \sqrt{\frac{a_i}{p_i}}}{n i^2}$	<p>p_i = perímetro da mancha i; a_i = área da mancha i; n_i = número de manchas i</p>	<p>Medida de Compacidade sensível à Fragmentação e à Complexidade. Sua abordagem é individualizada por partes (manchas), e os resultados descritos pela relação entre o somatório da “relação área-perímetro” dessas partes e o número de partes ao quadrado. Maiores valores indicam Complexidade e Fragmentação menores e, consequentemente, maiores Compacidades (limitado à $CI = 1$ para a figura de um círculo). Sua aplicação neste estudo foi distinta entre mancha total (múltiplas partes) e mancha principal (parte única). Referências: Li e Yeh (2004); Huang, Lu e Sellers (2007) e Schwartz (2010).</p>
CIb	Índice de compacidade de	Mancha principal	$\frac{2\pi \sqrt{\frac{\max(a_i)j}{\pi}}}{\max(p_i)j}$	<p>$\max(a_i)j$ = tamanho da mancha principal; $\max(p_i)j$ = perímetro da mancha principal</p>	<p>Métricas da paisagem similares à ED, que descrevem Complexidade e Fragmentação por relação entre perímetro e área (EIR), e perímetro, área e número de partes (MPAR). Maiores valores indicam maior Complexidade e/ou Fragmentação, e vice-versa. Referências: Geoghegan, Wainger e Bockstael (1997) e Irwin e Bockstael (2007).</p>
MPAR	Relação perímetro-área média	Mancha total	$\sum_i^n \frac{p_i}{a_i \cdot n_i}$	<p>p_i = perímetro da mancha i; a_i = área da mancha i; n_i = número de manchas i</p>	
EIR	Relação borda-interior	Mancha total	$\sum \frac{p_i}{a_i}$	<p>p_i = perímetro da mancha i; a_i = área da mancha i</p>	
CEN	Índice de centralidade	Mancha total	$\frac{\sum_{i=1}^{n-1} D_{ij}/n_{ij}}{\sqrt{A/\pi}}$	<p>D_{ij} = distâncias euclidianas entre centroide da mancha principal e manchas secundárias ij; n_{ij} = número de manchas secundárias; A = área total da mancha urbana</p>	<p>Descrita pelo somatório das distâncias euclidianas de afastamento entre os centroides geométricos das manchas secundárias e mancha principal, normalizado pelo raio de um círculo correspondente à área da mancha urbana total. Menores valores indicam menor Dispersão (não aplicável quando não há manchas secundárias). Referências: Huang, Lu e Sellers (2007) e Schwarz (2010).</p>
CR	Relação de compacidade de	Mancha total	$\frac{2\sqrt{\pi \cdot A}}{P}$	<p>A = área total da mancha urbana; P = perímetro externo total da mancha urbana.</p>	<p>Métrica de Compacidade baseada na “relação área-perímetro”. Similarmente à CI, os resultados são adimensionais e limitados a $CR = 1$ (para figura perfeita de um círculo), em que menores valores indicam Fragmentação e Complexidade maiores e, consequentemente, menor Compacidade. Todavia, a abordagem de CR não analisa individualmente as múltiplas partes, em que os cálculos são realizados a partir dos dados da mancha urbana como um todo, tomando sua aplicação mais direta, simples e focada na forma urbana independentemente de seu NP. Referências: Richardson (1961); Li, Goodchild e Church (2013); Braga (2016); Guo, Hu e Zheng (2020) e Menzori (2021).</p>
IPQ	Coefficiente Isoperimétrico	Mancha total	$\frac{4\pi \cdot A}{P^2}$	<p>A = área total da mancha urbana; P = perímetro externo total da mancha urbana.</p>	<p>Métrica de Compacidade que corresponde à raiz quadrada de CR, que também descreve os resultados por “relação área-perímetro” de forma adimensional, limitados a $IPQ = 1$ (círculo). A decomposição das equações realizadas por Menzori (2021) indica que a diferença entre CR e IPQ reside na forma de remoção do efeito escala (obtenção de resultados adimensionais limitados entre [0,1]), em que CR o faz por “radiação da área total” e IPQ por “potenciação do perímetro”. Referências: Osseman (1978); Montero e Bribiesca (2009); Li, Goodchild e Church (2013) e Menzori (2021).</p>

Quadro 1 - Métricas espaciais adotadas (continuação)

ID	Métrica	Escala	Equação	Variáveis	Descrição e Referências
CCM	Compacidade de e circularidade	Mancha total	$\frac{4A}{L^2}$	A = área total da mancha urbana; L = diâmetro do MEC da mancha urbana	Métricas de Compacidade com abordagem do tipo “figura de referência”, em que a área da mancha urbana é analisada em relação ao seu Menor Círculo Envolvente (MEC). Diferentemente de CR e IPQ, o enfoque na circularidade oferece maior sensibilidade para mensuração da Dispersão. Maiores valores indicam maior Compacidade e menor Dispersão. CCM representa seus resultados em uma escala de zero (ausência de Compacidade) até π (pi) (círculo perfeito), ao contrário de DCM que remove o efeito escala e representa seus resultados entre [0,1]. Referências: Gibbs (1961); Kim e Anderson (1984); Montero e Bribiesca (2009); Li, Goodchild e Church (2013) e Menzori (2021).
DCM	Compacidade de digital	Mancha total	$\frac{A}{Asc}$	A = área total da mancha urbana; Asc = área MEC da mancha urbana	
M1 DCIq	Relação Adimensional de Compacidade de digital e Coeficiente Isoperimétrico	Mancha total	$\frac{2a}{r \cdot p}$	a = área total da mancha urbana; r = raio do MEC da mancha urbana; p = perímetro externo total da mancha urbana.	Métricas Espaciais propostas por Menzori (2021), que descrevem as quatro propriedades geométricas (Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão) de maneira adimensional (escala [0,1]), em caráter explícito, agregado e aplicável à mancha urbana como um todo (independentemente de seu NP). Em síntese, as propostas residem nas decomposições das equações das métricas de Compacidade CR, IPQ e DCM, de modo a identificar as “Relações Adimensionais Área-Perímetro” (RAAP) e “Relações Adimensionais Área-Raio” (RAAR) inerentes às suas abordagens de “figura de referência” e “relação área-perímetro”. A partir das RAAP e RAAR obtidas, foram propostas as Métricas de Compacidade M1, M2 e M3, com sensibilidade para representar as propriedades geométricas de Fragmentação, Complexidade e Dispersão de maneira concomitante, porém com adoção de média geométrica, que representa tendências centrais que não sejam muito influenciadas pela assimetria de valores. Destaca-se que, nas propostas alçadas, valores negativos são inexistentes e valores nulos são praticamente impossíveis, sendo válida e adequada a adoção da média geométrica.
M2 CCr	Relação Adimensional de Compacidade de e Circularidade	Mancha total	$\sqrt{\frac{2a}{r \cdot p}}$	a = área total da mancha urbana; r = raio do MEC da mancha urbana; p = perímetro externo total da mancha urbana.	
M3 CCrDCIq	Relação Adimensional de Compacidade de, Circularidade e Coeficiente Isoperimétrico	Mancha total	$\sqrt[4]{\frac{8a^3}{r^3 \cdot p^3}}$	a = área total da mancha urbana; r = raio do MEC da mancha urbana; p = perímetro externo total da mancha urbana.	

Objeto de estudo, materiais e métodos

Araraquara como objeto de estudo

Localizada na região administrativa central do Estado de São Paulo (sendo a capital regional da mesma), e a 270 km de São Paulo capital, Araraquara possui população estimada em 228.664 habitantes em 2016, com taxa de urbanização estimada em 97% (IBGE, 2020a; SEADE, 2020). Na Figura 4 está ilustrada a localização da cidade.

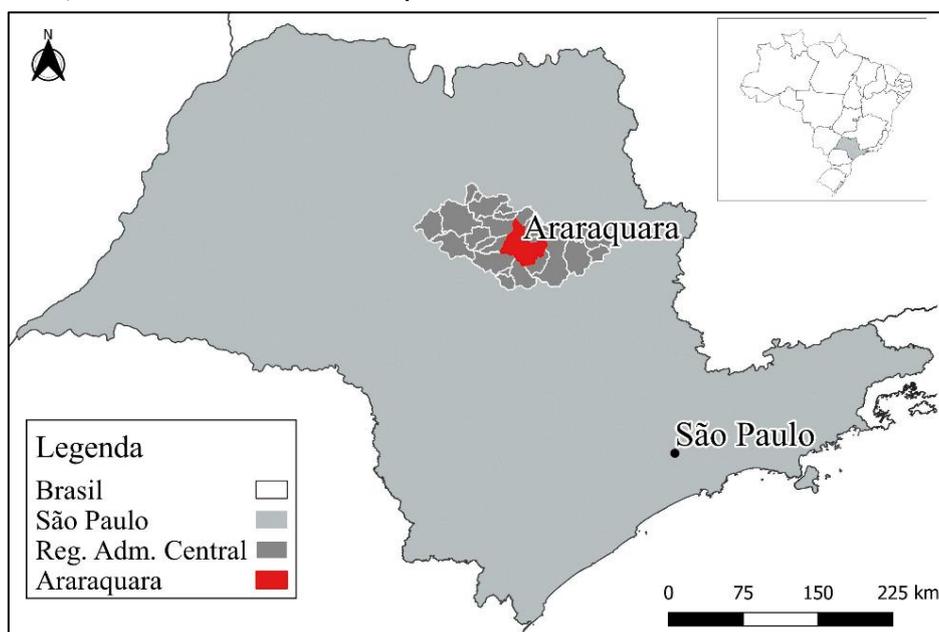
A evolução da ocupação do solo no município ocorreu de maneira simultânea aos processos de formação econômica em que, após a década de 1960, especialmente na década de 1970, Araraquara demonstrou um grande crescimento econômico impulsionado pelo “boom da laranja”⁴ e o Programa Proálcool. Este desenvolvimento foi acompanhado de intensivos processos de expansão urbana a partir da década de 1970 (Baeninger, 1995), e um desenvolvimento mais acentuado do setor imobiliário com desvios evidentes da legislação urbanística municipal, contribuindo para uma expansão territorial pouco planejada e desordenada em decorrência do chamado “milagre econômico brasileiro”.

Para Gonçalves (2022) e Peres (2012), houve uma transição nos processos de crescimento urbano, com padrões que deixaram de ser contíguos à mancha urbana principal e passaram direcionar a expansão para as

⁴O Grupo Cutrale, localizado em Araraquara, se tornou proeminente na década de 1960 quando geadas constantes prejudicaram a produção de laranja na Florida (EUA). Uma estimativa recente indicou que o Grupo Cutrale detinha aproximadamente 1/3 do mercado mundial de suco de laranja (Parra-Bernal, 2014).

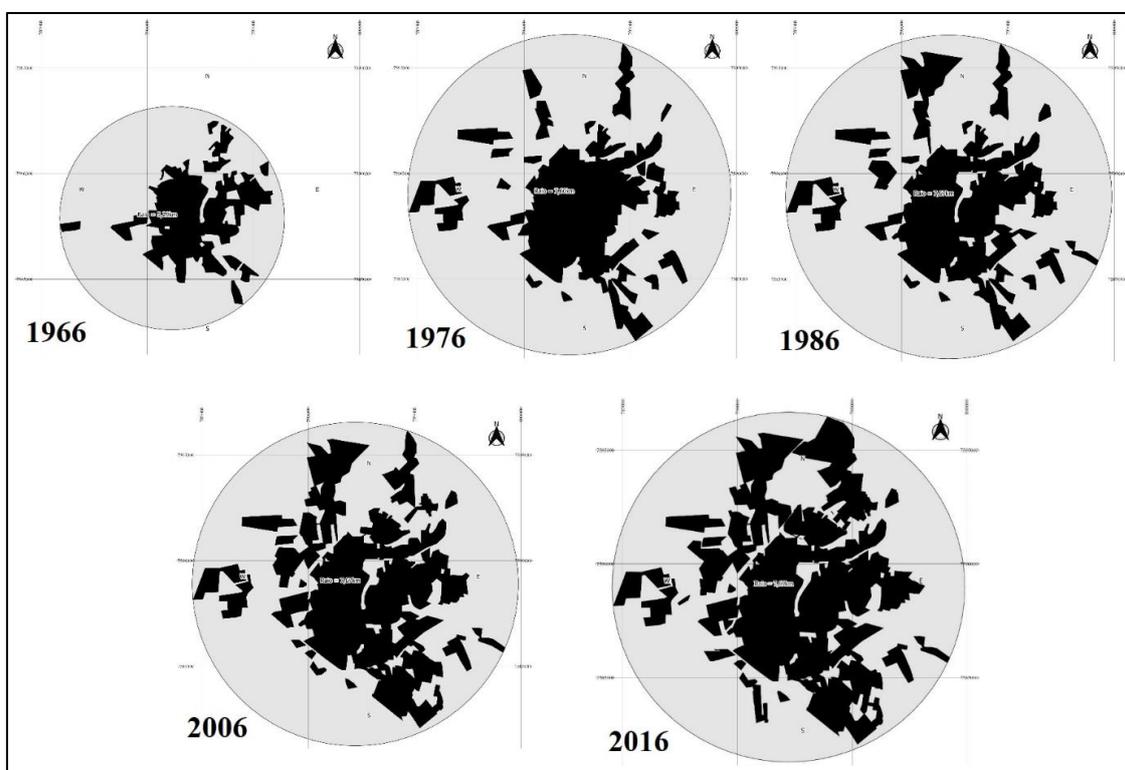
periferias, tendo como motivação interesses imobiliários estritamente especulativos. Na Figura 5 são ilustrados os cenários de crescimento da mancha urbana entre 1966 e 2016.

Figura 4 - Brasil, Estado de São Paulo e Araraquara



Fonte: adaptado de IBGE (2020b).

Figura 5 - Manchas urbanas de Araraquara (1966 - 1976 - 1986 - 2006 - 2016) e seus menores círculos envolventes



Fonte: adaptado de Menzori (2021, p. 48).

Materiais e métodos

As métricas espaciais selecionadas, apresentadas no Quadro 1, oferecem uma descrição quantitativa das características do crescimento urbano. Elas são aplicáveis a dados vetoriais e consideram variáveis geométricas, como área construída, perímetro e distâncias entre partes/manchas urbanas, obtidas por meio de geoprocessamento. Os cenários analisados abrangem as décadas de 1960, 1970 e 1980, e anos 2006 e 2016, com as respectivas populações correspondentes. É importante ressaltar que os cenários das três décadas iniciais são tratados como representativos dos anos de 1966, 1976 e 1986, respectivamente, para facilitar a comparação em decênios. Além disso, o ano de 2006 é de grande relevância devido à implementação do primeiro Plano Diretor e Política de Desenvolvimento Ambiental de Araraquara (PDPDA), promulgado em dezembro de 2005 (PMA, 2005). Este plano estabeleceu estratégias de planejamento ambiental urbano, incluindo a delimitação de Cinturões e Corredores Verdes para mitigar o espraiamento urbano (Menzori; Falcoski, 2017).

As análises foram conduzidas em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o *software* QGIS versão 3.2.0, e complementadas pelo *software* AutoCAD LT 2021 para medições de áreas e perímetros planimétricos a partir de dados vetoriais nos formatos *shapefile* e *drawing exchange format*. Para a representação georreferenciada, adotou-se a projeção *Universal Transversa de Mercator* (UTM), *Datum SAD/69 fuso 22S*, com cálculos de áreas e distâncias planimétricas. As métricas espaciais listadas no Quadro 1 foram aplicadas para medir a Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão nos cenários mencionados, bem como calcular as variações percentuais padronizadas em CAGR – *Compound Annual Growth Rate* ou Taxa de Crescimento Anual Composta, conforme Menzori (2024, p. 2).

A fim de compreender os dados coletados e relacionar os resultados da amostra, foram realizadas análises estatísticas descritivas e inferenciais. Foram aplicados Testes de Normalidade e de Hipótese (Menzori, 2024, p. 4) com um nível de significância de 5%, utilizando o *software* PAST 4.02 (Hammer; Harper; Ryan, 2001), bem como Coeficientes de Correlação Produto-Momento, r de Pearson (Menzori, 2024, p. 3). No Quadro 2, são apresentadas as estratificações usadas para as medidas correlacionais, junto a suas interpretações.

Considerando a natureza dos dados, a correlação de Pearson foi apropriada para avaliar as associações lineares entre as variações de aspectos geométricos, uma vez que os dados não são composicionais, ou seja, as variações percentuais observadas não somam 100% não sendo recalculadas como proporções dessa soma (Kynčlová; Hron; Filzmoser, 2017). É importante ressaltar que a correlação de Pearson não requer distribuição normal dos dados e pode ser aplicada a partir de três amostras (Weaver; Koopman, 2014). Os resultados correlacionais foram considerados como parte das estatísticas descritivas, ajudando a resumir as relações mais relevantes entre as variações das métricas calculadas a partir das décadas analisadas. Essas correlações auxiliam na identificação dos aspectos espaciais relacionados ao fenômeno de espraiamento urbano e a padrões de crescimento oscilatórios que possam estar relacionados à teoria da Difusão-Coalescência.

Devido à variedade de métricas aplicadas e para uma melhor compreensão dos resultados, as comparações entre as medidas foram organizadas usando a análise de *Boxplot*, conforme Menzori (2024, p. 4). Essa análise permite extrair a tendência central dos resultados por meio da amplitude interquartílica, além de identificar graus de dispersão e assimetria nos valores. A amplitude representa a faixa de variação anual observada nas medidas de Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão. A assimetria de caixa (esperada, pois os dados não seguem distribuição normal), pode destacar discrepâncias entre os períodos analisados. É importante observar que as variações de Agregação (MPS e LPI) foram consideradas com inversão de sinal nas análises de Fragmentação, enquanto as variações de Compacidade do tipo “figura de referência” (DCM) também contemplaram inversão de sinal nas análises de Dispersão, devido a seu caráter de favorecer reduções ou variações menores nos resultados.

Quadro 2 - Estratificações adotadas para interpretação do Coeficiente de Correlação de Pearson e do Coeficiente de Determinação

Valores	Força (interpretação)
0,00 – 0,10	Nula ou desprezível
0,10 – 0,30	Correlação fraca
0,30 – 0,60	Correlação moderada
0,60 – 0,90	Correlação forte
0,90 – 1,00	Muito forte ou perfeita

Fonte: adaptado de Akoglu (2018, p. 92).

Resultados e discussões

Os resultados completos das análises podem ser consultados em Menzori (2024). As Tabelas 1 a 4 descrevem as variações anuais (CAGR) por período e aspecto geométrico, enquanto a Tabela 5 mostra as taxas CAGR da Densidade Populacional Urbana (DU). A métrica DU é tratada separadamente, pois não está relacionada aos aspectos geométricos. PSSD e PSCOV não estão nessas tabelas, mas auxiliaram na análise e discussão dos resultados, à medida que métricas focadas nas manchas secundárias estão incluídas, pois descrevem agrupamentos nas periferias.

O primeiro período analisado, de 1966 a 1976, revela variações anuais das métricas indicando um padrão de crescimento urbano difuso. Durante esse período, observa-se aumento acentuado na Fragmentação urbana, com impacto negativo na Compacidade. Além disso, registram-se discretas reduções na Dispersão e Complexidade, enquanto a densidade populacional urbana sofre significativa queda.

Entre 1976 e 1986, ocorre uma transição nos padrões de crescimento urbano. Nesse período, há redução na Fragmentação e Dispersão, aumento na Compacidade e variações quase nulas na Complexidade da mancha urbana total. Entretanto, a Complexidade nas manchas secundárias aumenta, sugerindo que o aumento da Compacidade se relaciona ao adensamento das novas áreas construídas nas periferias criadas anteriormente. A densidade populacional também cresce.

O intervalo de 1986 a 2006 é marcado por reduções na Fragmentação e Dispersão, com aumento na Compacidade e variações quase nulas na Complexidade da mancha urbana total. Complexidade nas manchas secundárias também cresce, e a densidade populacional urbana mantém sua trajetória ascendente.

No período de 2006 a 2016, observam-se aumentos na Fragmentação e Complexidade da mancha urbana total, bem como reduções na Dispersão e, em certa medida, na Compacidade. A Complexidade nas manchas secundárias também cresce, embora em menor intensidade em relação aos dois períodos anteriores. A densidade populacional apresenta variações anuais próximas a zero.

Tabela 1 - Taxas CAGR por aspecto por métrica, entre as décadas de 1966 e 1976

Fragmentação (escala macro)		Complexidade (escala micro)		Complexidade (escala macro)		Dispersão (escala macro)		Compacidade (escala macro)	
NP	0,105	FD	-0,010	MSI(a)	-0,018	CEN	-0,010	CI	-0,086
PD	0,018	AWMFD	-0,009	ED	-0,003	DCM*	-0,001	CR	-0,033
LSI	0,043	AWMSI	-0,014	MPAR	-0,005	-	-	IPQ	-0,065
EIR	0,091	MSI(b)	0,003	-	-	-	-	DCM	0,001
MPS*	0,024	SI	0,005	-	-	-	-	M1	-0,032
LPI*	0,023	-	-	-	-	-	-	M2	-0,016
-	-	-	-	-	-	-	-	M3	-0,024
Q1	0,023	Q1	-0,010	Q1	-0,012	Q1	-0,008	Q1	-0,057
MED	0,034	MED	-0,009	MED	-0,005	MED	-0,006	MED	-0,033
Q3	0,079	Q3	0,003	Q3	-0,004	Q3	-0,003	Q3	-0,020

Nota: *inversões de sinal aplicáveis.

Tabela 2 - Taxas CAGR por aspecto por métrica, entre as décadas de 1976 e 1986

Fragmentação (escala macro)		Complexidade (escala micro)		Complexidade (escala macro)		Dispersão (escala macro)		Compacidade (escala macro)	
NP	-0,017	FD	0,018	MSI(a)	0,018	CEN	-0,002	CI	0,011
PD	-0,032	AWMFD	0,022	ED	-0,009	DCM*	-0,014	CR	0,001
LSI	-0,001	AWMSI	0,027	MPAR	-0,007	-	-	IPQ	0,001
EIR	-0,023	MSI(b)	0,019	-	-	-	-	DCM	0,014
MPS*	-0,019	SI	0,003	-	-	-	-	M1	0,008
LPI*	0,001	-	-	-	-	-	-	M2	0,004
-	-	-	-	-	-	-	-	M3	0,006
Q1	-0,022	Q1	0,018	Q1	-0,008	Q1	-0,011	Q1	0,002
MED	-0,018	MED	0,019	MED	-0,007	MED	-0,008	MED	0,006
Q3	-0,005	Q3	0,022	Q3	0,006	Q3	-0,005	Q3	0,010

Nota: *inversões de sinal aplicáveis.

Tabela 3 - Taxas CAGR por aspecto por métrica, entre a década de 1986 e ano de 2006

Fragmentação (escala macro)		Complexidade (escala micro)		Complexidade (escala macro)		Dispersão (escala macro)		Compacidade (escala macro)	
NP	-0,007	FD	0,001	MSI(a)	0,005	CEN	-0,005	CI	0,006
PD	-0,016	AWMFD	0,017	ED	-0,007	DCM*	-0,010	CR	0,002
LSI	-0,002	AWMSI	0,023	MPAR	0,004	-	-	IPQ	0,004
EIR	-0,002	MSI(b)	0,005	-	-	-	-	DCM	0,010
MPS*	-0,007	SI	-0,004	-	-	-	-	M1	0,007
LPI*	0	-	-	-	-	-	-	M2	0,003
-	-	-	-	-	-	-	-	M3	0,005
Q1	-0,007	Q1	0,001	Q1	-0,002	Q1	-0,009	Q1	0,003
MED	-0,005	MED	0,005	MED	0,004	MED	-0,008	MED	0,005
Q3	-0,002	Q3	0,017	Q3	0,005	Q3	-0,006	Q3	0,007

Nota: *inversões de sinal aplicáveis.

Tabela 4 - Taxas CAGR por aspecto por métrica, entre os anos de 2006 e 2016

Fragmentação (escala macro)		Complexidade (escala micro)		Complexidade (escala macro)		Dispersão (escala macro)		Compacidade (escala macro)	
NP	0,013	FD	0,011	MSI(a)	0,004	CEN	-0,004	CI	-0,016
PD	0	AWMFD	0,003	ED	-0,002	DCM*	-0,012	CR	-0,004
LSI	0,005	AWMSI	0,005	MPAR	0,043	-	-	IPQ	-0,008
EIR	0,056	MSI(b)	0,008	-	-	-	-	DCM	0,012
MPS*	0	SI	-0,005	-	-	-	-	M1	0,002
LPI*	0,008	-	-	-	-	-	-	M2	0,001
-	-	-	-	-	-	-	-	M3	0,002
Q1	0,001	Q1	0,003	Q1	0,001	Q1	-0,010	Q1	-0,007
MED	0,007	MED	0,005	MED	0,004	MED	-0,008	MED	-0,002
Q3	0,012	Q3	0,008	Q3	0,024	Q3	-0,006	Q3	0,002

Nota: *inversões de sinal aplicáveis

Tabela 5 - Crescimento populacional observado entre a década de 1960 e o ano de 2016

Ano/Década	População	Densidade Urbana (DU)	CAGR
≅1966	82.898	39,928	*
≅1976	100.438	23,074	-5,3%
≅1986	144.322	28,228	2,0%
2006	199.657	31,916	0,6%
2016	228.664	32,238	0,1%

Apesar de não se enquadrarem nas quatro propriedades geométricas analisadas, o Desvio Padrão (PSSD) e o Coeficiente de Variação (PSCOV) das manchas secundárias evidenciam taxas CAGR positivas em todos os períodos, com maior destaque entre 1966 e 1976; e 1976 e 1986. Assim, o crescimento urbano nesses períodos resultou em diferenças maiores nos tamanhos das manchas periféricas, uma distribuição espacial relativamente menos homogênea e com menor relevância da mancha principal no ambiente construído como um todo, principalmente entre 1966 e 1976.

Esses resultados indicam que houve uma maior difusão do crescimento urbano em manchas periféricas menores no primeiro período, mas essas partes foram sendo adensadas pela agregação de novas áreas construídas na periferia. Há, ainda, diferenças estatisticamente significativas entre o primeiro (1966 – 1976) e os demais intervalos analisados. Esses resultados sugerem que maiores densidades populacionais e Compacidades urbanas estão associadas a menores Fragmentações, e vice-versa. Assim como a Compacidade urbana estava relacionada a maior Complexidade nas manchas secundárias.

Dessa forma, padrões distintos de crescimento urbano e densidade populacional se destacam no período de 1966 a 1976, conforme discutido por Gonçalves (2022) e Peres (2012). Nos trinta anos seguintes (1976 – 1986 e 1986 – 2006), foi observada uma mudança significativa, com redução da Fragmentação e aumento da

Compacidade, indicando uma transição desses padrões. Já no último período avaliado (2006 – 2016), as variações indicam uma possível retomada do crescimento mais espraiado, com Fragmentação e Complexidade em ascensão e reduções em Compacidade e Dispersão. As diminuições na Dispersão podem estar relacionadas ao adensamento das manchas secundárias que, embora representem um crescimento não contíguo à mancha principal, podem influenciar positivamente na Compacidade geral do ambiente construído.

Essa transição nos padrões de crescimento urbano pode estar relacionada à teoria de Difusão-Coalescência de Dietzel *et al.* (2005), explicitada anteriormente. Ademais, nas cidades brasileiras, esses padrões de crescimento são frequentemente atribuídos à especulação imobiliária, na qual a criação de novas áreas urbanas mais afastadas resulta na formação de reservas de valor (vazios urbanos). Inicialmente subutilizadas, essas áreas aguardam melhorias, muitas vezes iniciadas pelo poder público, na infraestrutura e nos serviços urbanos. Isso as torna mais atrativas e valorizadas para o setor imobiliário (Gonçalves, 2022).

Em Araraquara, observou-se uma dispersão do ambiente construído urbano entre 1966 e 1976, seguida por uma transição para formas mais compactas até 2006. Entre 2006 e 2016, os resultados são ambíguos, indicando uma possível retomada do ciclo com processos de expansão/difusão, possivelmente associados ao Programa Minha Casa Minha Vida (PMCMV) e às práticas de implementação dos planos espaciais pelas administrações municipais (Menzori; Sousa; Gonçalves, 2021; 2023). No entanto, os processos de crescimento urbano após a implementação do PDPDA de 2005 foram mais moderados do que na fase de difusão observada entre 1966 e 1976. Em suma, há evidências de transição nos processos de crescimento urbano em Araraquara, conforme a teoria de Difusão-Coalescência de Dietzel *et al.* (2005), representados por processos de crescimento não contíguos à mancha urbana principal, seguidos por sucessivos adensamentos dessas áreas. Deste modo, a discussão sobre a ocorrência de espraiamento urbano em Araraquara é válida sob a ótica das métricas espaciais, porém restrita ao primeiro período analisado (1966–1976).

Com relação às métricas espaciais em questão, as análises indicaram relações claras entre as métricas de Compacidade, Densidade Populacional Urbana, Dispersão, Fragmentação e Complexidade. No entanto, também foram identificadas limitações em algumas métricas incapazes de descrever de forma mais precisa essas quatro propriedades geométricas. Isso inclui as métricas da paisagem NP, MPS, PD, LPI, FD, AWMPFD, LSI, SI, AWMSI, MSI, ED, MPAR e EIR – adotadas por Dietzel *et al.* (2005) –, que possuem limitações na descrição da Dispersão, em que multipartes idênticas (mas com diferentes afastamentos entre fragmentos) podem ser descritas por resultados idênticos – o mesmo ocorre para CI, CR e IPQ. Alternativamente, CCM e DCM são sensíveis à Dispersão, porém limitadas na descrição de Fragmentação e Complexidade.

Ademais, em uma revisão da literatura sobre espraiamento urbano, Chetry (2023) discute a inexistência de uma definição universalmente aceita, em que diversas medidas são utilizadas para avaliar tal fenômeno, dificultando a comparação e generalização de resultados. Além disso, há poucos estudos abrangentes que sintetizam as tendências e padrões emergentes deste fenômeno. Nesse sentido, as métricas espaciais M1, M2 e M3 (Menzori, 2021), elencadas neste estudo, podem ser uma contribuição valiosa pois abordam Compacidade a partir das propriedades de Fragmentação, Complexidade e Dispersão simultaneamente, minimizando as limitações inerentes a métricas comumente reproduzidas na literatura.

Conclusões

A análise dos padrões espaciais e aspectos geométricos do crescimento físico-territorial é de grande relevância no contexto do desenvolvimento urbano. Neste estudo, foram empregadas métricas espaciais (restritas à geometria bidimensional) para quantificar a forma urbana. Essa abordagem possibilitou uma representação quantitativa dos principais aspectos físico-espaciais relacionados ao crescimento urbano em Araraquara. No entanto, é importante destacar as precisões dos dados para as décadas de 1960, 1970 e 1980 (e ausência de um cenário para 1990) como limitações, sendo que esses anos foram representados como 1966, 1976 e 1986, a fim de manter a padronização nos intervalos de análise.

Os resultados indicam que o período de 1966 a 1976 foi caracterizado por um crescimento físico-territorial difuso, com declínios significativos na compacidade e densidade populacional, ou seja, aspectos relacionados ao fenômeno do espraiamento urbano. Nos períodos seguintes, entre 1976–1986, e 1986–2006, embora tenha havido um crescimento urbano em direção às periferias (agregação em manchas secundárias), as medidas espaciais apontam para uma tendência oposta, com compacidade e densidade populacional maiores, menor fragmentação, dispersão e complexidade na mancha urbana total. Isso sugere um padrão mais consistente com a teoria da Difusão-Coalescência. No entanto, o período de 2006 a 2016 apresentou variações mais contrastantes, com mudanças na compacidade urbana, fragmentação e complexidade, indicando que o

crescimento urbano pode ter sido influenciado tanto por estratégias locais de planejamento urbano (PDPDA) quanto por fatores intervenientes externos como o PMCMV.

Em resumo, as métricas espaciais mostraram potencial para descrição das dinâmicas físico-territoriais ao longo das décadas, proporcionando uma análise detalhada dos aspectos geométricos de Compacidade, Fragmentação, Complexidade e Dispersão. Isso oferece uma perspectiva significativa sobre os processos de crescimento urbano e suas semelhanças com o fenômeno de espraiamento urbano, bem como suas transições à luz da teoria da Difusão-Coalescência. Como próximo passo, sugere-se estender a aplicação das métricas espaciais de Compacidade para diferentes cidades, permitindo uma análise mais abrangente das dinâmicas territoriais de crescimento urbano ao longo do tempo – preferencialmente de forma automatizada e adaptada para bases de dados mais abrangentes, como o MapBiomass, que disponibiliza dados públicos de uso e cobertura da terra no Brasil.

Referências

- AGUILERA, F.; VALENZUELA, L. M.; BOTEQUILHA-LEITAO. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: a case study in a Spanish metropolitan area. **Landscape and Urban Planning**, v. 99, n. 3/4, p. 226-238, 2011.
- AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish Journal of Emergency Medicine**, v. 18, p. 91-93, 2018.
- ANGEL, S. *et al.* (org.). **Atlas of urban expansion: the 2016 edition volume 1 areas and densities**. New York: Lincoln Institute of Land Policy, 2016.
- ANGEL, S.; PARENT, J.; CIVCO, D. L. Ten compactness properties of circles: measuring shape in geography. **The Canadian Geographer**, v. 54, n. 4, p. 441-461, 2010.
- BAENINGER, R. **Região administrativa central: região de governo de araraquara e região de governo de São Carlos**. Campinas: UNICAMP, Núcleo de Estudos de População, 1995.
- BRAGA, R. Avaliação da sustentabilidade da expansão do perímetro urbano da cidade de Piracicaba – SP por meio de indicadores de forma urbana. **Geografa, Ensino & Pesquisa**, v. 20, n. 2, p. 33-44, 2016.
- CHAKRABORTY, S. *et al.* Building in or out? Examining urban expansion patterns and land use efficiency across the global sample of 466 cities with million+ inhabitants. **Habitat International**, v. 120, 102503, 2022a.
- CHAKRABORTY, S. *et al.* In pursuit of sustainability: spatio-temporal pathways of urban growth patterns in the world's largest megacities. **Cities**, v. 131, 103919, 2022b.
- CHESTRY, V. A critical review of urban sprawl studies. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 7, n. 28, p. 1-13, 2023.
- DENG, J. S. *et al.* Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. **Landscape Urban Plan**, v. 92, p. 187-198, 2009.
- DIETZEL, C. *et al.* Diffusion and coalescence of the Houston Metropolitan Area: evidence supporting a new urban theory. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 32, p. 231-246, 2005.
- EWING, R. H. Characteristics, causes, and effects of sprawl: a literature review. In: MARZLUFF, J. *et al.* (ed.). **Urban ecology**. Berlin: Springer, 2008.
- FRENKEL, A.; ASHKENAZI, M. Measuring urban sprawl: how can we deal with it? **Environment and Planning B-Planning & Design**, v. 35, n. 1, p. 56-79, 2008.
- GEOGHEGAN, J.; WAINGER, L.A.; BOCKSTAEEL, N. E. Spatial landscape indices in a hedonic framework: an ecological economics analysis using GIS. **Ecological Economics**, v. 23, p. 251-264, 1997.
- GIBBS, J. P. A method for comparing the spatial shapes of urban units. **Urban research methods**, v. 122, p. 99-106, 1961.
- GONÇALVES, L. M. Os vazios urbanos como elemento estruturador do planejamento urbano. In: ROSA, N.C. *et al.* (org.). **Open Science Research XI**. São Paulo: Editora Científica, 2022.
- GUNAWARDENA, K. R.; WELLS, M. J.; KERSHAW, T. Utilising green and bluespace to mitigate urban heat island intensity. **Science of The Total Environment**, v. 584-585, p. 1040-1055, 2017.

- GÜNERALP, B.; PERLSTEIN, A.; SETO, K. Balancing urban growth and ecological conservation: a challenge for planning and governance in China. **Ambio**, v. 44, p. 532–543, 2015.
- GÜNERALP, G. *et al.* Trends in urban land expansion, density, and land transitions from 1970 to 2010: a global synthesis. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 4, 044015, 2020.
- GUO, Z.; HU, Y.; ZHENG, X. Evaluating the effectiveness of land use master plans in built-up land management: a case study of the Jinan Municipality, eastern China. **Land Use Policy**, v. 91, 104369, 2020.
- HAHS, A.; MCDONNELL, M. Selecting independent measures to quantify Melbourne's urban–rural gradient. **Landscape and Urban Planning**, v. 78, p. 435–448, 2006.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P. D. PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia Electronica**, v. 4, n. 1, art. 4, 2001.
- HEROLD, M.; COUCLELIS, H.; CLARKE, K. The role of spatial metrics in the analysis and modeling of urban land use change. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 29, n. 4, p. 369–399, 2005.
- HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N.; CLARKE, K. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 286–302, 2003.
- HEROLD, M.; SCEPAN, J.; CLARKE, K. C. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. **Environment and Planning A**, v. 34, n. 8, p. 1443–1458, 2002.
- HUANG, J.; LU, X. X.; SELLERS, J. A global comparative analysis of urban form: applying spatial metrics and remote sensing. **Landscape and Urban Planning**, v. 82, p. 184–197, 2007.
- HUANG, Y.; LUO, X. Reshaping economic geography in China. In: HUANG, Y.; BOCCHI, A.M. (ed.). **Reshaping economic geography in east Asia**. Washington: The World Bank, 2009.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Estimativas da população**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas-novoportal/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html>. Acesso em: 15 jun. 2020a.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha municipal**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/15774-malhas.html?=&t=downloads>. Acesso em: 4 set. 2020b.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População recenseada**. Brasília, 1962. Disponível em: https://seculoxx.ibge.gov.br/images/seculoxx/arquivos_download/populacao/1962/populacao1962aeb_07_08.pdf. Acesso em: 19 dez. 2020.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Resultado do Censo Demográfico – 1970**. 1973. Disponível em: https://seculoxx.ibge.gov.br/images/seculoxx/arquivos_download/populacao/1973/populacao_m_1973aeb_061_a_063.xls. Acesso em: 15 dez. 2020.
- IRWIN, E. G.; BOCKSTAEL, N. E. The evolution of urban sprawl: Evidence of spatial heterogeneity and increasing land fragmentation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 52, p. 20672–20677, 2007.
- JAEGER, J. A. G. *et al.* Suitability criteria for measures of urban sprawl. **Ecological Indicators**, v. 10, p. 397–406, 2010.
- JIA, W. *et al.* Characterizing urban sprawl using multi-stage remote sensing images and landscape metrics. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 30, p. 861–879, 2006.
- JIA, M. *et al.* Public policy change and its impact on urban expansion: an evaluation of 265 cities in China. **Land Use Policy**, v. 97, p. 1–14, 2020.
- KIM, C. E.; ANDERSON, T. A. Digital disks and a digital compactness measure. In: ANNUAL ACM SYMPOSIUM ON THEORY OF COMPUTING, 16., New York, 1984. **Anais [...]**. Nova Iorque: Press, 1984.
- KYNČLOVÁ, P.; HRON, K.; FILZMOSER, P. Correlation between compositional parts based on symmetric balances. **Mathematical Geosciences**, v. 49, p. 777–796, 2017.

- LI, W.; GOODCHILD, M.; CHURCH, R. An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 27, p. 1227-1250, 2013.
- LI, X.; YEH, A. G-O. Analyzing spatial restructuring of land use patterns in a fast growing region using remote sensing and GIS. **Landscape and Urban Planning**, v. 69, p. 335-354, 2004.
- MAHENDRA, A.; SETO, K. C. **Upward and outward growth: managing urban expansion for more equitable cities in the global south**. World Resources Institute. Washington, 2019. Disponível em: https://files.wri.org/d8/s3fs-public/upward-outward-growth_2.pdf. Acesso em: 15 dez. 2020.
- MAHTTA, R.; MAHENDRA, A.; SETO, K. Building up or spreading out? Typologies of urban growth across 478 cities of 1 million+. **Environmental Research Letters**, v. 14, 124077, 2019.
- MALINVERNI, E. Change detection applying landscape metrics on high remote sensing images. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 77, 2011.
- MENZORI, I. D. **Dinâmicas territoriais e métricas espaciais: avaliação de expansão urbana em cidade de porte médio**. São Carlos, 2021. 258 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.
- MENZORI, I. D. **Material complementar de pesquisa sobre métricas espaciais do crescimento urbano: Apêndice A**. São Carlos, 05 abr. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.14671.09125>. Acesso em: 5 abr. 2024.
- MENZORI, I. D.; FALCOSKI, L. A. N. Mapeamento e análise das áreas de preservação permanente e dos corredores de integração ecológica de Araraquara, SP. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 7-20, abr./jun. 2017.
- MENZORI, I. D.; SOUSA, I. C. N.; GONÇALVES, L. M. Local government shift and national housing program: Spatial repercussions on urban growth. **Land Use Policy**, v. 126, 106548, 2023.
- MENZORI, I. D.; SOUSA, I. C. N.; GONÇALVES, L. M. Urban growth management and territorial governance approaches: a master plans conformance analysis. **Land Use Policy**, v. 105, 105436, 2021.
- MONTERO, R. S.; BRIBIESCA, E. State of the art of compactness and circularity measures. **International Mathematical Forum**, v. 4, p. 1305-1335, 2009.
- NOVOTNÝ, J.; CHAKRABORTY, S.; MAITY, I. Urban expansion of the 43 worlds' largest megacities: A search for unified macro-patterns. **Habitat International**, v. 129, 102676, 2022.
- OKE, T. R. The micrometeorology of the urban forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences**, v. 324, n. 1223, p. 335-349, 1989.
- OSSERMAN, R. Isoperimetric inequality. **Bulletin of the American Mathematical Society**, v. 84, n. 6, p. 1182-1238, 1978.
- PARRA-BERNAL, G. Cutrale-Safra eleva proposta para adquirir Chiquita. **Época Negócios**, São Paulo, 6 nov. 2014. Disponível em: <https://epocanegocios.globo.com/Informacao/Acao/noticia/2014/10/cutrale-safra-eleva-proposta-para-adquirir-chiquita.html>. Acesso em 15 dez. 2020.
- PERES, R. B. **O planejamento regional e urbano e a questão ambiental: análise da relação entre o plano de bacia hidrográfica Tietê-Jacaré e os planos diretores municipais de Araraquara e São Carlos, SP**. São Carlos, 2012. 370 f. Tese (Doutorado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.
- PHAM, H. M.; YAMAGUCHI, Y.; BUI, Q-T. A case study on the relation between city planning and urban growth using remote sensing and spatial metrics. **Landscape and Urban Planning**, v. 100, p. 223-230, 2011.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE ARARAQUARA. **Lei Complementar nº 350**, de 27 de Dezembro de 2005, Plano Diretor de Desenvolvimento e Política Ambiental de Araraquara (PDDPA). 2005.
- REIS, J.; SILVA, E.; PINHO, P. Spatial metrics to study urban patterns in growing and shrinking cities. **Urban Geography**, v. 37, 2015.
- RICHARDSON, L. F. A note: measuring compactness as a requirement of legislative apportionment. **Mid-West Journal of Political Science**, v. 5, p. 70-74, 1961.
- ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, p. 472-475, 2009.

- SAURA, S.; CARBALLAL, P. Discrimination of native and exotic forest patterns through shape irregularity indices: An analysis in the landscapes of Galicia, Spain. **Landscape Ecology**, v. 19, p. 647-662, 2004.
- SCHETKE, S.; HAASE, D. Multi-criteria assessment of socio-environmental aspects in shrinking cities. Experiences from eastern Germany. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 28, n. 7, p. 483-503, 2008.
- SCHNEIDER, A.; SETO, K. C.; WEBSTER, D. R. Urban growth in Chengdu, Western China: application of remote sensing to assess planning and policy outcomes. **Environment and Planning B: Planning & Design**, v. 32, n. 3, p. 323-345, 2005.
- SCHNEIDER, A.; WOODCOCK, C. E. Compact, dispersed, fragmented, extensive? A comparison of urban growth in twenty-five global cities using remotely sensed data, pattern metrics and census information. **Urban Studies**, v. 45, n. 3, p. 659-692, 2008.
- SCHWARZ, N. Urban form revisited-Selecting indicators for characterising European cities. **Landscape and Urban Planning**, v. 96, n. 1, p. 29-47, 2010.
- SETO, K. C.; FRAGKIAS, M. quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics. **Landscape Ecology**, v. 20, 2005.
- SETO, K. C.; GUNERALP, B.; HUTYRA, L. R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 109, n. 40, p. 16083-16088, 2012.
- SILVA, E. A.; AHERN, J.; WILEDEN, J. Strategies for landscape ecology: an application using cellular automata models. **Progress in Planning**, v. 70, p. 133-177, 2008.
- SISTEMA ESTADUAL DE ANÁLISE DE DADOS. **Perfil dos municípios brasileiros**. Disponível em: <https://perfil.seade.gov.br/>. Acesso em: 15 set. 2020.
- SOUSA, I. C. N.; MENZORI, I. D.; BRAGA, R. Urbanização sustentável: métricas espaciais e tipologias de crescimento. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 22, n. 84, p. 36-55, 2021.
- SOUZA, A. C. da S. *et al.* Isovistas aplicadas à localização de unidades de informação para mobilidade de pedestres. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 407-421, out./dez. 2020.
- SUN, C. *et al.* Quantifying different types of urban growth and the change dynamic in Guangzhou using multi-temporal remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 409-417, 2013.
- TORRENS, P. A Toolkit for measuring sprawl. **Applied Spatial Analysis and Policy**, v. 1, p. 5-36, 2008.
- WEAVER, B.; KOOPMAN. An SPSS Macro to compute confidence intervals for Pearson's correlation. **The Quantitative Methods for Psychology**, v. 10, n. 1, p. 29-39, 2014.
- WENG, Y-C. Spatiotemporal changes of landscape pattern in response to urbanization. **Landscape and Urban Planning**, v. 81, n. 4, p. 341-353, 2007.
- WIRTH, M. A. **Shape analysis & measurement. department of computing and information science.** University of Guelph, 2004. Disponível em: <http://www.cyto.purdue.edu/cdroms/micro2/content/education/wirth10.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2020.
- WU, J. G. *et al.* spatiotemporal patterns of urbanization: the case of the two fastest growing metropolitan regions in the United States. **Ecological Complexity**, v. 8, n. 1, p. 1-8, 2011.
- YU, X. J.; NG, C. N. Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban-rural transects: a case study of Guangzhou, China. **Landscape and Urban Planning**, v. 79, n. 1, p. 96-109, 2007.

Ivan Damasco Menzori

Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Validação de dados e experimentos, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana | Universidade Federal de São Carlos | Rodovia Washington Luís, km 235 | São Carlos - SP - Brasil | CEP 13565-905 | Tel.: (16) 3351-8295 | E-mail: menzori@ufscar.br

Luciana Márcia Gonçalves

Supervisão, Validação de dados e experimentos, Redação - revisão e edição.

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana | Universidade Federal de São Carlos | E-mail: lucianamg@ufscar.br

Editora: **Karin Regina de Castro Marins**

Ambiente Construído

Revista da Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

www.scielo.br/ac

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.