

ARBORIZAÇÃO URBANA E QUALIDADE DO AR NA CIDADE DE DESCALVADO-SP: UMA ANÁLISE QUANTITATIVA E ESPACIAL

Tatiane Ferreira Olivatto¹

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
São Carlos, SP, Brasil



Felipe Facci Inguaggiato²

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
São Carlos, SP, Brasil



Lucas Tobias Barbalho³

Universidade Federal de São Carlos (UFSCar)
São Carlos, SP, Brasil



Enviado em 20 jan. 2024 | Aceito em 17 abr. 2025

Resumo: O artigo aborda a importância da arborização urbana na melhoria da qualidade de vida e na remoção de poluentes atmosféricos. Destaca-se a relevância das áreas verdes urbanas, como praças, parques e arborização de ruas, na promoção da harmonia paisagística, no lazer, no sombreamento, na estabilidade microclimática e na manutenção da qualidade do ar. O trabalho foi desenvolvido no município de Descalvado-SP e utilizou a plataforma online e gratuita i-Tree e o software ArcGIS para estimar e especializar a Porcentagem de Cobertura Vegetal (PCV) e a Valoração Ambiental em cada setor censitário urbano do município. Os resultados obtidos demonstraram que as regiões centrais da cidade, caracterizadas por alta densidade populacional e baixos índices de vegetação, apresentam menor valorização do CO₂. Já setores periurbanos, com áreas verdes mais representativas - como Áreas de Preservação Permanente (APPs) ou fragmentos de vegetação - impactam positivamente em maiores valores de PCV. Verificou-se portanto, a importância na análise quantitativa e espacial da cobertura vegetal e valoração ambiental da remoção de poluentes.

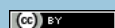
Palavras-chave: Arborização Urbana; Qualidade do Ar; Cobertura Vegetal; Valoração Ambiental.

URBAN TREE COVER AND AIR QUALITY IN THE CITY OF DESCALVADO-SP: A QUANTITATIVE AND SPATIAL ANALYSIS

Abstract: The article addresses the importance of urban afforestation in improving the quality of life and removing air pollutants. The relevance of urban green areas, such as squares, parks, and street trees, in promoting landscape harmony, leisure, shading, microclimatic stability and maintaining air quality is highlighted. The work was developed in the city of Descalvado-SP and used the free online platform i-Tree and the ArcGIS software to estimate and specialize the Percentage of Vegetation Cover (PCV) and the Environmental Valuation in each urban census sector of the municipality. The results showed that the central regions of the city, characterized by high population density and low vegetation indexes, have a lower CO₂ value. On the other hand, peri-urban sectors, with more representative green areas - such as Permanent Preservation Areas (PPAs) or vegetation fragments - have a positive impact on higher PCV values. Therefore, the importance of the removal of pollutants in the quantitative and spatial analysis of the vegetation cover and environmental valuation was verified.

Keywords: Urban Tree; Air Quality; Vegetation Cover; Environmental Valuation.

1. Doutoranda em Engenharia Urbana; Engenheira Ambiental e Sanitarista. Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5770-7088>. E-mail: tatianeolivatto@ufscar.br.
2. Doutor em Engenharia Urbana; Geógrafo. Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7932-4865>. E-mail: fp.facci@hotmail.com.
3. Gestor e Analista Ambiental. Orcid: <https://orcid.org/0009-0009-2025-0190>. E-mail: lucas.barbalho0690@gmail.com.



ARBORIZACIÓN URBANA Y CALIDAD DEL AIRE EN LA CIUDAD DE DESCALVADO-SP: UN ANÁLISIS CUANTITATIVO Y ESPACIAL

Resumen: El artículo aborda la importancia de la arborización urbana en la mejora de la calidad de vida y en la remoción de contaminantes atmosféricos. Se destaca la relevancia de las áreas verdes urbanas, como plazas, parques y el arbolado en calles, en la promoción de la armonía paisajística, el ocio, la sombra, la estabilidad microclimática y el mantenimiento de la calidad del aire. El estudio fue desarrollado en el municipio de Descalvado-SP y utilizó la plataforma en línea y gratuita i-Tree, además del software ArcGIS, para estimar y espacializar el Porcentaje de Cobertura Vegetal (PCV) y la Valoración Ambiental en cada sector censal urbano del municipio. Los resultados obtenidos demostraron que las regiones centrales de la ciudad, caracterizadas por una alta densidad poblacional y bajos índices de vegetación, presentan una menor valorización del CO₂. En cambio, los sectores periurbanos, con áreas verdes más representativas –como Áreas de Preservación Permanente (APP) o fragmentos de vegetación– impactan positivamente en mayores valores de PCV. Se verificó, por lo tanto, la importancia del análisis cuantitativo y espacial de la cobertura vegetal y de la valoración ambiental en la remoción de contaminantes.

Palabras clave: Arborización Urbana; Calidad del Aire; Cobertura Vegetal; Valoración Ambiental.



Introdução

Em um contexto em que a preservação dos recursos florestais naturais é considerada essencial para a sustentação da biosfera, a arborização urbana se evidencia na manutenção da qualidade de vida de sua população. De modo geral, a conceituação correlacionada à arborização urbana refere-se a toda cobertura vegetal que compõe a paisagem urbana sendo, tecnicamente, dividida em “áreas verdes (praças, parques, bosques, jardins e jardins) e arborização de ruas e avenidas (vias públicas)” (MORIGI e BOVO, 2013).

Apesar de não tratar especificamente da terminologia arborização urbana, a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda 12m² de área verde por habitante da zona urbana (DE ARRUDA *et al.* (2013). A Sociedade Brasileira de Arborização Urbana (SBAU), por sua vez, recomenda um mínimo de 15 m²/habitante (SBAU, 1996).

A importância destas áreas vegetadas para a melhoria da qualidade de ambiental nas áreas urbanas é consenso entre pesquisadores, seja proporcionando harmonia paisagística, espaços para lazer e atividade física para população, sombreamento para pedestres e ciclistas, sustentação de fauna, estabilidade microclimática, amenização do escoamento superficial das águas pluviais e manutenção da qualidade do ar (MORIGI e BOVO, 2013; DA SILVA, DOS SANTOS e DE OLIVEIRA, 2016 e SCHEUER e NEVES, 2016; ENDRENY *et al.*, 2017).

Do ponto de vista acadêmico, os serviços ecossistêmicos urbanos são frequentemente categorizados em serviços de provisão, regulação, suporte e culturais (MEA, 2005). No contexto urbano, os serviços de regulação, como a purificação do ar e a regulação térmica, são especialmente relevantes, dada a alta concentração de poluentes e a intensificação do calor nas cidades (BOLUND e HUNHAMMAR, 1999). Já os serviços culturais, como a recreação e o bem-estar psicológico proporcionado por parques e áreas verdes, são cada vez mais valorizados em estudos que relacionam a natureza urbana à saúde mental e à coesão social (BRATMAN *et al.*, 2019). A manutenção desses serviços depende não apenas da quantidade, mas também da qualidade da vegetação, o que inclui a diversidade de espécies, a estrutura dos ecossistemas e a conectividade entre fragmentos verdes (ARONSON *et al.*, 2017).

Desse modo, é importante ressaltar que a gestão dos serviços ecossistêmicos urbanos requer uma abordagem interdisciplinar, envolvendo planejamento urbano, políticas públicas e participação comunitária (ERNSTSON *et al.*, 2010). A integração de conhecimentos científicos com práticas

tradicionais e locais pode potencializar os benefícios das áreas verdes, favorecendo o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e inclusivas (BERKES *et al.*, 2000). Além disso, a valoração econômica dos serviços ecossistêmicos vem se destacando como uma ferramenta importante para sensibilizar gestores públicos e a sociedade sobre a necessidade de investir na conservação e expansão das áreas vegetadas urbanas (COSTANZA *et al.*, 1997). Dessa forma, a preservação e o manejo adequado desses ecossistemas são fundamentais para assegurar a qualidade de vida urbana e a sustentabilidade ambiental a longo prazo.

Por outro lado, do ponto de vista do planejamento e a gestão urbana, questões referentes à arborização e às áreas verdes nas cidades partem do pressuposto de um planejamento que vise a sustentabilidade e perspectiva ecológica na constituição das cidades, muito embora seu alicerce metodológico e teórico possua baixa densidade reflexiva e analítica (Souza, 2020), o que reflete em diferentes perspectivas interpretativas e aplicáveis. Todavia, como contribuição desse modelo analítico, destacam-se questões como a interpretação de variáveis ambientais no espaço urbano, entre elas arborização nas vias, coleta de resíduos e saneamento básico acessível, permeadas por um contexto histórico que era marcado por conferências como o Relatório Brundtland, no ano de 1987, que resultou em um documento chamado Nosso Futuro Comum, que propõe o desenvolvimento socioeconômico e espacial de modo sustentável.

Do ponto de vista legislativo, a própria Lei n. 6.766, de 1979 traz luz, embora de forma adjacente, a questões atreladas a áreas verdes em faixas urbanas não edificáveis e diagnósticos socioambientais dentro das municipalidades (Brasil, 1979).

Skorupa, Saito e Neves (2003), Jim (1989) e Garcia *et al.* (2021) destacam ainda o aspecto espacial de elementos referentes à arborização nos espaços urbanos, abordando a importância de sua distribuição de forma homogênea, de forma a abranger todas as regiões da malha urbana, inclusive ao longo dos mananciais que cortam as cidades – que compõem as Áreas de Preservação Permanente (APP), presentes no Código Florestal Brasileiro, na Lei 12.651/2012, que são responsáveis por preservar recursos hídricos, a paisagem, estabilidade geológica, a fauna e flora, o solo e o bem-estar da população humana (BRASIL, 2012).

Existem diferentes formas de analisar a arborização em espaços urbanos, sendo uma delas mediante abordagens quantitativas. Por exemplo, através da medida fornecida pelo IBGE de porcentagem de vias públicas arborizadas, levantadas juntamente com as variáveis de infraestrutura urbana durante o Censo. Contudo, vale ressaltar que esta porcentagem exclui as áreas verdes. Outra desvantagem desta fonte de dados se refere ao recorte temporal, uma vez que o Censo Brasileiro ocorre, via de regra, a cada 10 anos.

Assim, uma alternativa para mensurar a arborização urbana em sua totalidade é através da Porcentagem de Cobertura Vegetal (PCV). Pode-se citar ainda o Índice de Cobertura Vegetal por Habitante (ICVH), como nos valores de referência da OMS e SBAU já mencionadas (DA SILVA, DOS SANTOS e DE OLIVEIRA, 2016). Neste contexto, para a mensuração da cobertura vegetal para fins de planejamento e gestão urbanas, técnicas que dispensam exaustivos levantamentos de campo e alto investimento são prioridades na esfera pública, destacando-se técnicas de sensoriamento remoto (PARMEHR *et al.*, 2016).

No que tange às técnicas embasadas em imagens de satélite, destaca-se o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*). Contudo, apesar da automaticidade deste método, os resultados ficam sujeitos à resolução espacial das imagens, que no caso de imagens disponíveis gratuitamente, como Landsat (com resolução de 30 metros), acabam

por não identificar fielmente áreas fragmentadas, como é o caso de áreas verdes urbanas (JENSEN, 2009, p. 388).

Alternativamente, métodos de amostragem aleatória são utilizados para estimativa de cobertura arbórea urbana desde a década de 1970 e, quando associados ao sensoriamento remoto, facilitam a identificação de áreas fragmentadas (NOWAK *et al.*, 1996). Apesar de uma proposta relativamente manual, apresenta resultados similares ao NDVI, com a vantagem de dispensar recursos humanos especializados (OLIVATTO, STANGANINI e MELANDA, 2019).

Numa corrente paralela, a valoração também vem sendo amplamente utilizada para avaliar atributos ambientais, tratando essencialmente da “*estimativa da importância de algo*” (COSTANZA *et al.*, 2017). Por estar relacionada diretamente à presença de vegetação, a manutenção da poluição atmosférica é frequentemente alvo de valoração ambiental, principalmente devido à temática preponderante do aquecimento global. Neste contexto, a estimativa de remoção de poluentes atmosféricos pela arborização urbana, seja em unidades quantitativas (indicadores físicos) ou monetárias (CONSTANTINO *et al.*, 2018), também pode mostrar-se uma dimensão promissora de cobertura vegetal.

Em 1996, foi apresentada a ferramenta i-Tree Canopy, desenvolvida pelo Serviço Florestal Americano (USDA Forest Service), que permite estimar a PTC e valorar serviços ecossistêmicos de forma rápida, empregando o método de amostragem aleatória com base em sensoriamento remoto (Google Earth) (NOWAK, 1996). Desde 2002, a ferramenta é disponibilizada online, sem custos (NOWAK, GREENFIELD, 2018; HILBERT *et al.*, 2019).

Deste modo, reconhecendo a importância da cobertura vegetal em áreas urbanas e da mensuração das mesmas para o planejamento e gestão urbanas, o objetivo deste trabalho é quantificar e espacializar a arborização urbana na porção urbana do município de Descalvado-SP, analisando seus benefícios em termos de qualidade do ar. Para tal, utilizou-se o método de amostragem aleatória do i-Tree Canopy, com foco nas grandezas de Cobertura Vegetal e Valoração Ambiental do serviço ecossistêmico de remoção de poluentes.

Caracterização da Área de Estudo

O município de Descalvado se localiza na Região Centro-Leste do estado de São Paulo, entre as coordenadas: latitude 21°54'14" sul e longitude 47°37'10" oeste. O município ocupa aproximadamente 753,706 km², sendo que a área urbana, foco deste trabalho, ocupa cerca de 12,616 km². A população municipal é 31.756 habitantes, com densidade demográfica de 42,13 habitantes/km² (IBGE, 2022).

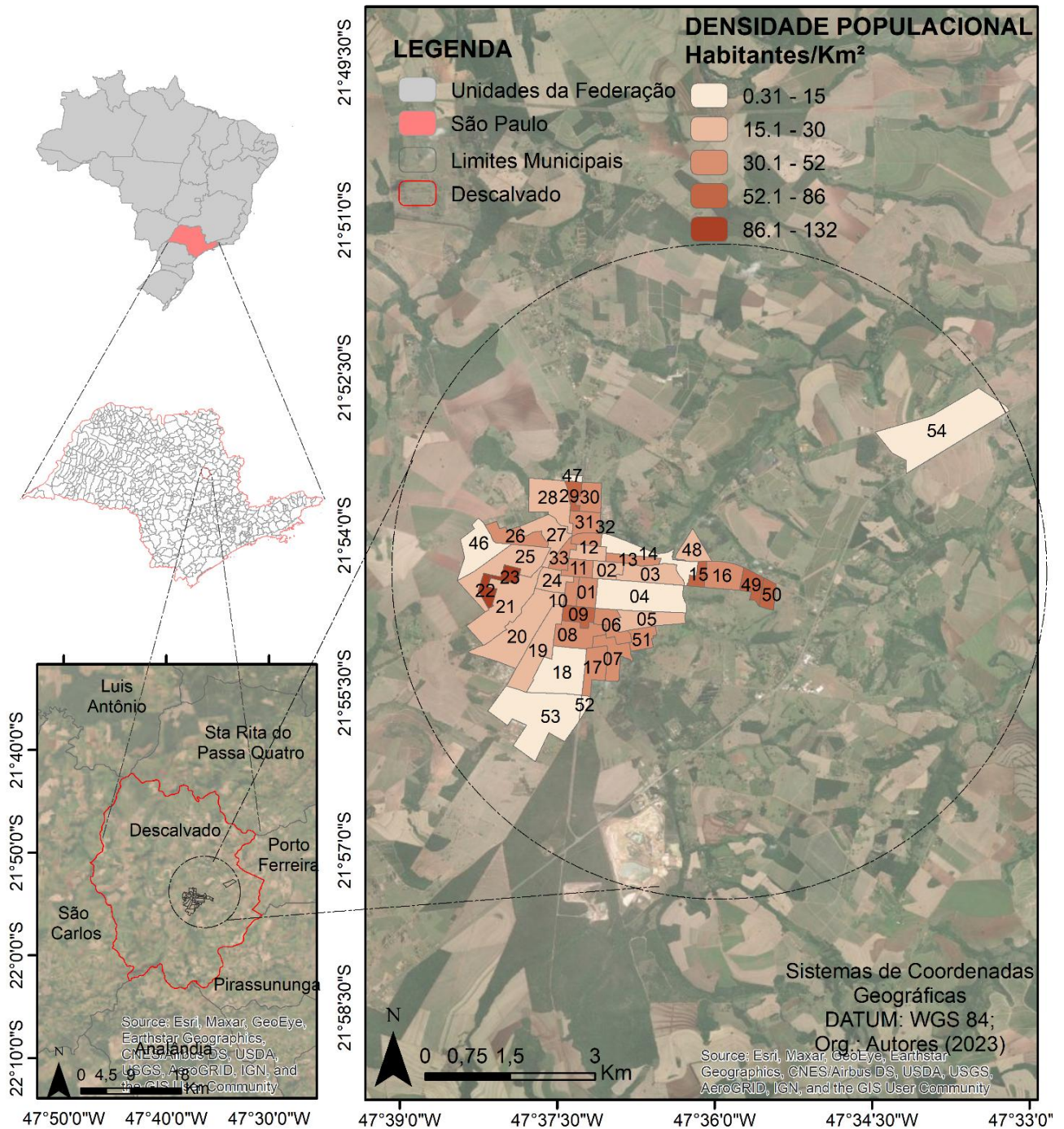
Os dados da publicados pela Fundação Seade (2022), expõem um cenário simultâneo de crescimento populacional e urbano no município, uma vez que demonstram a evolução no tocante tanto a população municipal quanto suas taxas de urbanização. Para efeito de comparação, enquanto no ano 2000 a taxa de urbanização e a população instalada em áreas urbanas eram, respectivamente, de 83,5% e 24.100 habitantes, no ano de 2020 essas taxas saltam para 92,7% e 30.064 habitantes.

De acordo com a Figura 1, responsável por demonstrar a localização do município e a densidade populacional nos setores censitários considerados urbanos (estimativa para 2020⁴), verifica-se certa homogeneidade na distribuição populacional, que varia entre 15 e 86 habitantes/km²

⁴ Os dados populacionais por setor censitário utilizados neste trabalho se referem à estimativa para o ano de 2020, com base nos dados do censo IBGE 2010, pois, até a data de desenvolvimento deste trabalho, não haviam sido divulgados os dados detalhados do Censo 2022.

- salva exceção do setor censitário central da cidade, com densidade populacional entre 86.1 e 132 habitantes/km². Ressalta-se que alguns setores maiores ainda possuem uma densidade que se apresenta entre 1 e 15 habitantes/km², justificado pelas áreas extensas dos mesmos, se comparados aos demais (IBGE, 2010).

Figura 1 - Localização do município de Descalvado-SP



Fonte: AUTORES, 2023.

Estes números refletem em intensas mudanças de solo no município, seja principalmente pelo processo de urbanização, ou pela atividade agropecuária ou exploração de areia para indústrias de vidro e fundição, resultando na degradação de parte do bioma Cerrado e Mata Atlântica existente no local (IBGE, 2022). Ainda assim, o município abriga uma Área de Proteção Ambiental (APA) que totaliza cerca de 40.000 hectares (cerca de 50% do município) abrangendo as porções sul e central (OLIVEIRA 1995).

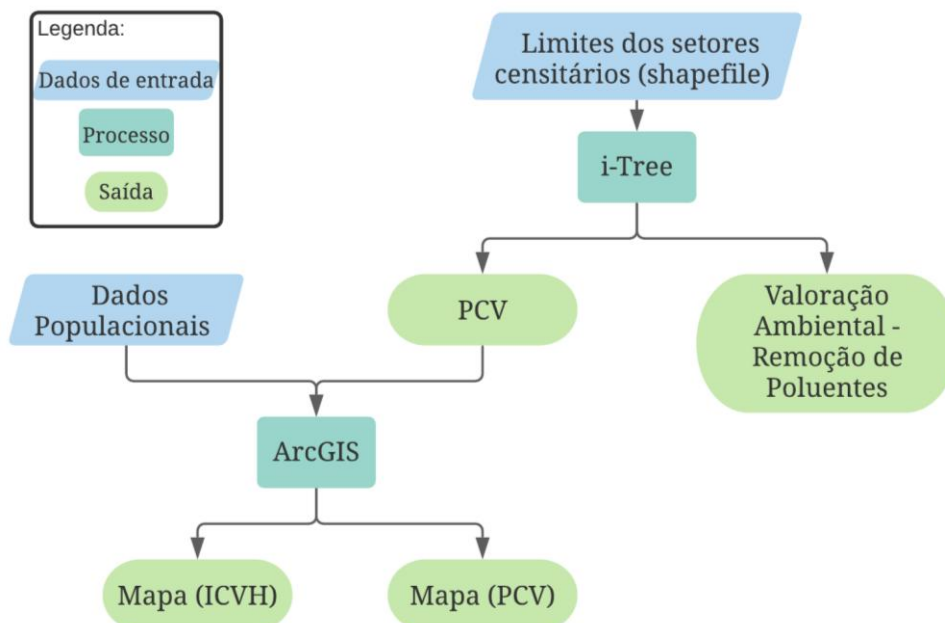
No que diz respeito à vegetação existente na área urbana, a maioria se dá nas Áreas de Preservação Permanente (APP) existentes no entorno dos rios que cortam a cidade. Além destas, uma parte está inserida em áreas verdes públicas, como na Praça Santa Cruz das Almas, Praça da Matriz e Praça do Jardim Velho, enquanto outras se dão pela arborização urbana, uma vez que 96,6 % das vias públicas urbanas do município são arborizadas (IBGE, 2010).

Materiais e Método

Para o desenvolvimento deste trabalho, utilizou-se como unidade territorial os setores censitários do município de Descalvado. Do total de 54 setores identificados no município no censo de 2010, foram considerados apenas os 42 setores caracterizados como urbanos (ilustrados na Figura 1).

Para a estimativa de cobertura vegetal, remoção de poluentes atmosféricos e valoração monetária em cada setor censitário foi utilizada a plataforma online e gratuita i-Tree. Para a elaboração dos mapas, foi utilizado o software ArcGIS. O Fluxograma da Figura 2 apresenta as principais etapas envolvidas no método desenvolvido.

Figura 2 - Fluxograma das etapas do método



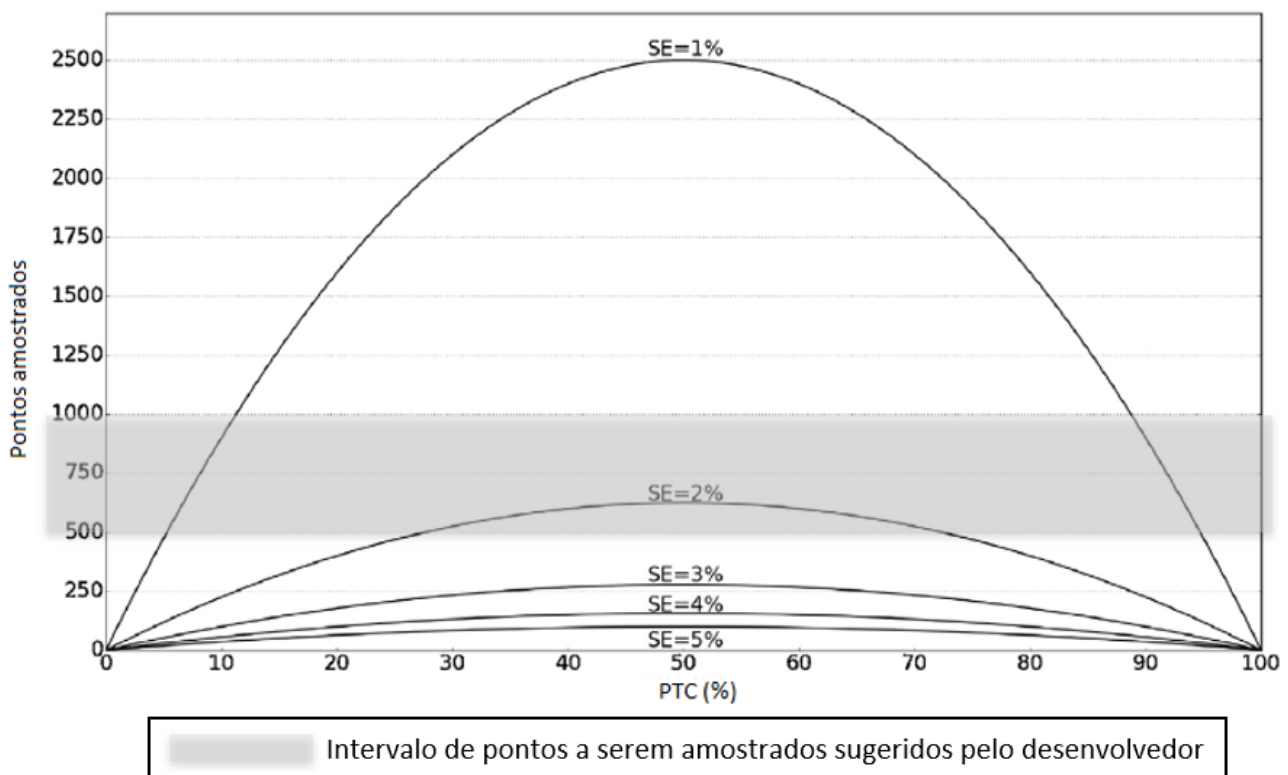
Fonte: AUTORES, 2023.

O primeiro processo da etapa metodológica, desenvolvido no i-Tree, objetivou obter a PCV para cada setor censitário a partir da classificação randômica de pontos em classes de “Vegetação” e “Não Vegetação”, com base na imagem do Google Earth (que é a base cartográfica padrão do i-Tree).

Cabe mencionar que a precisão dos resultados depende de três fatores: (i) habilidade humana de classificar corretamente os pontos, (ii) visibilidade da imagem (por exemplo, ausência de nuvens) e (iii) quantidade de pontos categorizados (USDA FOREST SERVICE, 2021).

Segundo o documento de notas técnicas disponibilizado pelo USDA Forest Service (2021), quanto maior o número de pontos, maior é a precisão - e menor o desvio padrão (SE). Parmehr *et al.* (2016) relacionaram o SE apropriado a partir da relação entre o número de pontos e o valor de PTC (vide Figura 3).

Figura 3 - SE estimado variando com PTC (%) e Número de pontos amostrados



Fonte: Adaptado de PARMEHR, 2016.

Para o intervalo de pontos sugeridos pelo desenvolvedor, de 500 a 1000 pontos, destacado em cinza na Figura 3, o SE aproxima-se de 2% e, com base nestas considerações, foi o SE máximo adotado nas classificações realizadas neste trabalho.

A ferramenta i-Tree Canopy fornece como resultado, além da PCV, a valoração ambiental referente ao serviço ecossistêmico de remoção de poluentes. São apresentados resultados

quantitativos (t) e monetário (US\$) em relação a diversos poluentes. Neste estudo o foco foi a valoração ambiental do dióxido de carbono (CO₂) sequestrado anualmente pela vegetação e armazenado na estrutura da mesma.

O segundo processo da etapa metodológica, desenvolvido no ArcGIS, tratou desenvolvimento de dois mapas: PCV e ICVH (sendo o ICVH calculado a partir da divisão da área de cobertura vegetal pelo número de habitantes em cada setor censitário). Para tal, os resultados fornecidos pelo i-Tree foram representados espacialmente de acordo com os setores censitários investigados.

Resultados e Discussão

Os resultados da etapa de mensuração da PCV e ICVH, bem como os resultados da valoração ambiental de CO₂ para cada setor censitário estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados de PCV, ICVH e Valoração Ambiental de CO₂

Setor	Área Vegetada (ha)	PCV (%)	ICVH (km ² /hab)	CO ₂ anual (t)	CO ₂ anual (US\$)	CO ₂ armazenado (t)	CO ₂ armazenado (US\$)
01	1,37	8,50	20,43	15,32	785	348,73	19726
02	3,52	24,40	89,05	39,5	2025	991,99	50862
03	12,06	38,92	212,81	135,3	6937	3397,91	174220
04	17,88	24,20	199,21	200,57	10284	5036,99	258260
05	5,48	18,00	90,10	61,51	3154	1544,78	79205
06	3,40	17,11	32,71	38,1	1953	956,71	49053
07	7,09	28,55	65,39	79,56	4079	1998,07	102447
08	4,39	14,12	35,67	49,22	2524	1236,11	63378
09	2,56	16,39	27,88	28,7	1472	720,87	36961
10	1,73	18,25	38,00	19,46	998	488,79	25061
11	1,99	14,55	33,75	22,32	1144	560,56	28741
12	2,26	15,56	55,19	25,34	1299	636,31	32625
13	2,69	20,24	51,54	30,19	1548	758,1	38870
14	17,91	51,38	341,01	200,98	10305	5047,34	258791
15	1,52	17,11	19,75	17,11	877	429,65	22030
16	4,89	17,63	48,00	54,82	2811	1376,74	70589
17	5,71	23,40	70,29	64,1	3287	1609,86	82542
18	4,58	7,50	76,82	51,35	2633	1289,59	66121
19	11,25	22,22	108,91	126,19	6470	3169,03	162485
20	20,77	27,25	171,21	232,99	11946	5851,22	300008
21	28,35	42,92	231,20	318,1	16310	7988,57	409596
22	0,95	9,17	6,95	10,65	546	267,56	13719
23	1,67	19,00	14,43	18,74	961	470,68	24133
24	7,07	37,87	134,34	79,3	4066	1991,42	102106
25	16,02	28,89	174,04	179,74	9216	4513,93	231442

26	2,42	9,79	30,11	27,13	1391	681,29	34931
27	14,39	46,72	194,95	161,47	8279	4055,02	207912
28	19,38	43,59	222,70	217,43	11148	5460,55	279978
29	2,20	23,70	37,11	24,64	1263	618,86	31730
30	3,41	18,25	48,87	38,25	1961	960,63	49254
31	7,51	40,81	102,35	84,31	4323	2117,33	108561
32	1,30	13,00	26,75	14,57	747	365,79	18755
33	2,35	19,17	55,76	26,4	1354	663,09	33998
46	3,09	7,60	208,08	34,66	1777	870,32	44624
47	0,59	16,39	150,10	6,6	339	165,83	8503
48	3,74	20,48	67,29	41,99	2153	1054,45	54065
49	1,93	13,00	20,27	21,62	1109	542,99	27841
50	1,38	12,07	16,33	15,48	794	388,85	19938
51	2,74	18,50	44,57	30,71	1574	771,2	39542
52	0,64	15,29	209,33	7,22	370	181,21	9291
53	15,99	14,55	140,95	179,4	9199	4505,5	231009
54	31,63	24,29	7623,13	354,94	18199	8913,84	457037

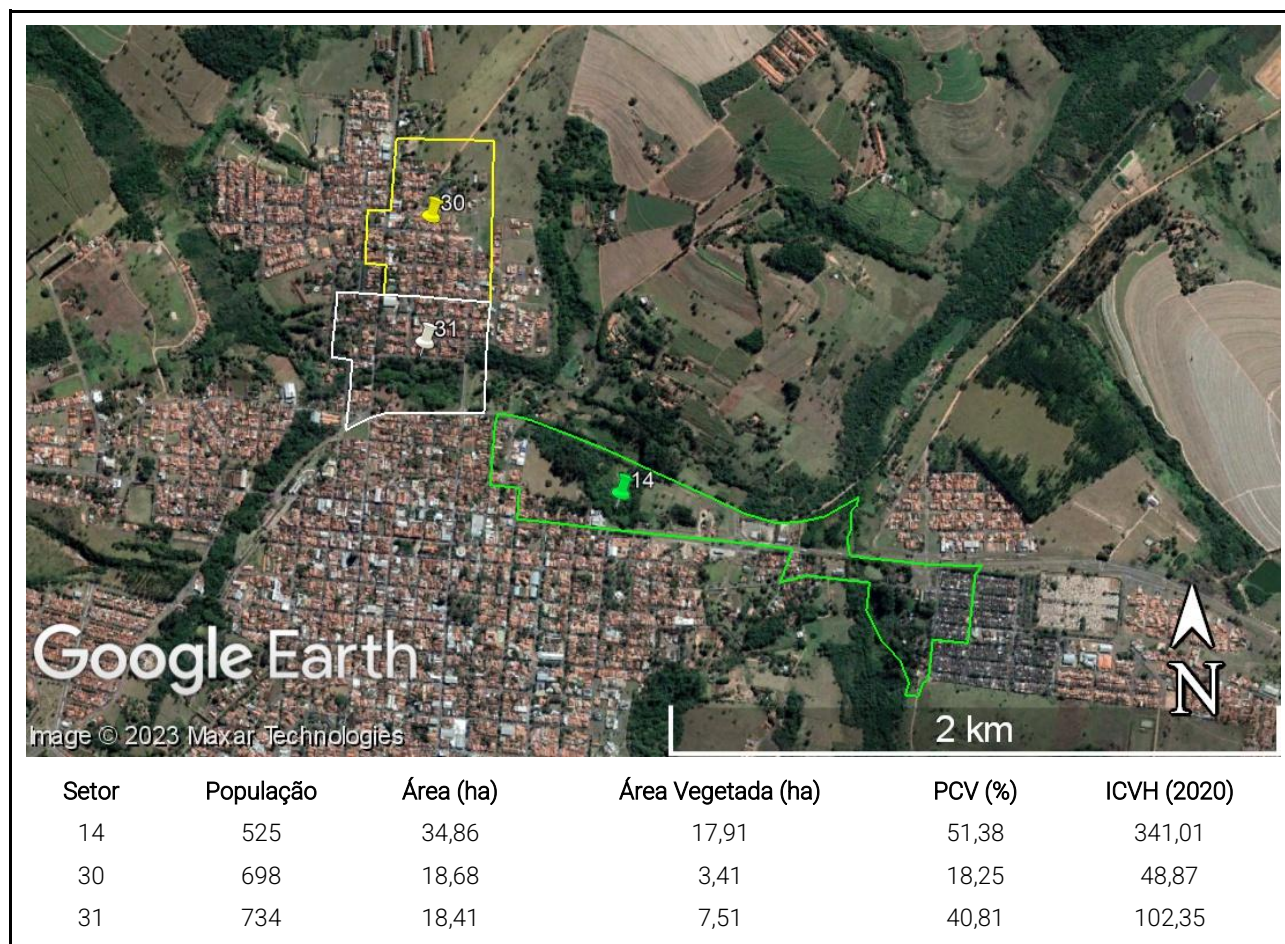
Fonte: AUTORES, 2023.

Inicialmente, um ponto a ser destacado se refere à vantagem do i-Tree na quantificação de áreas fragmentadas e da arborização das vias, sendo que esta última muitas vezes é desconsiderada em alguns métodos de quantificação, como já exposto no item de introdução do trabalho.

Assim, de modo geral, observam-se alguns pontos em relação aos resultados de valoração ambiental de CO₂ para cada setor censitário. De modo holístico, na Figura 4, observa-se algumas concentrações espaciais de setores que variam entre baixos e elevados índices de valoração. Setores concentrados a oeste, de modo geral, apresentam elevados índices de valoração ambiental, enquanto setores concentrados a leste - com exceção a um setor no extremo leste - possuem taxas menores.

Algumas justificativas para tais fatores serão melhor exploradas quando observadas as taxas de ICVH e o PCV. Contudo, vale salientar que as taxas com menores índices de valoração de CO₂ são as regiões centrais da cidade, com uma representativa concentração habitacional e baixos índices de vegetação. Como justificativa, considera-se o caráter de ocupação urbana proposta por Rolnik (2015), em que o espaço é constituído por relações de concentração populacional voltadas ao capital, sem compartimentação ou configuração que contemplem a sustentabilidade e a ocupação de áreas verdes. Santos (1996) corrobora a autora, ao descrever que as cidades partem da ocupação, muitas vezes, sem ordenamento e planejamento, trazendo luz à problemática supracitada.

Figura 4 – Detalhe dos setores 14, 30 e 31



Fonte: AUTORES, 2023.

Essas conexões foram exploradas, outrora, sob a perspectiva de valoração da terra (MARICATO, COLOSSO, 2020), o que, de certo modo, estabelece um paradoxo dialético em relação à abordagem de Rolnik (2015) sobre a relação entre áreas verdes e o capital nas cidades. Atrelada a essas questões, conforme mencionado no capítulo introdutório deste artigo, a idealização de cidades sustentáveis fundamentadas nessas perspectivas não se traduz em um sentido prático, tal qual mencionado por Souza (2020), haja vista o caráter deficitário da aplicabilidade desses conceitos nas cidades.

Além disso, pode-se verificar que setores censitários contemplados com áreas verdes maiores, como APPs ou fragmentos de vegetação, se destacam em aspectos quantitativos de PCV em relação a setores com predominância estrita de arborização de vias. É o caso dos setores censitários 30 e 31, por exemplo, ilustrados na Figura 4, que apesar de áreas semelhantes, 18 ha, possuem valores de PCV com diferença significativa.

Neste caso específico, o fato do setor 31 possuir uma grande porção de áreas verdes, as quais não são habitadas, não resultam em menor população, pois o setor 30 possui uma grande porção de vazio urbano, o qual também não é habitado. Isso não ocorre no setor censitário 14, também ilustrado na Figura 4, que apesar de ser maior que os setores 30 e 31, possui menor população e maior PCV, uma vez que incidem neste setor muitas APPs e fragmentos de vegetação, resultando no maior ICVH.

Por fim, as Figuras 5 e 6 se referem, respectivamente, aos mapas de PCV e ICVH, resultantes da segunda etapa da metodologia, enquanto as Figuras 7 e 8 se referem aos resultados de remoção de CO₂ (em toneladas) e de valoração ambiental (em dólares americanos), respectivamente, para análises de remoção anual e de armazenamento (para composição de tronco, raízes, galhos e folhas).

Figura 5 – Mapa de PCV em Descalvado-SP

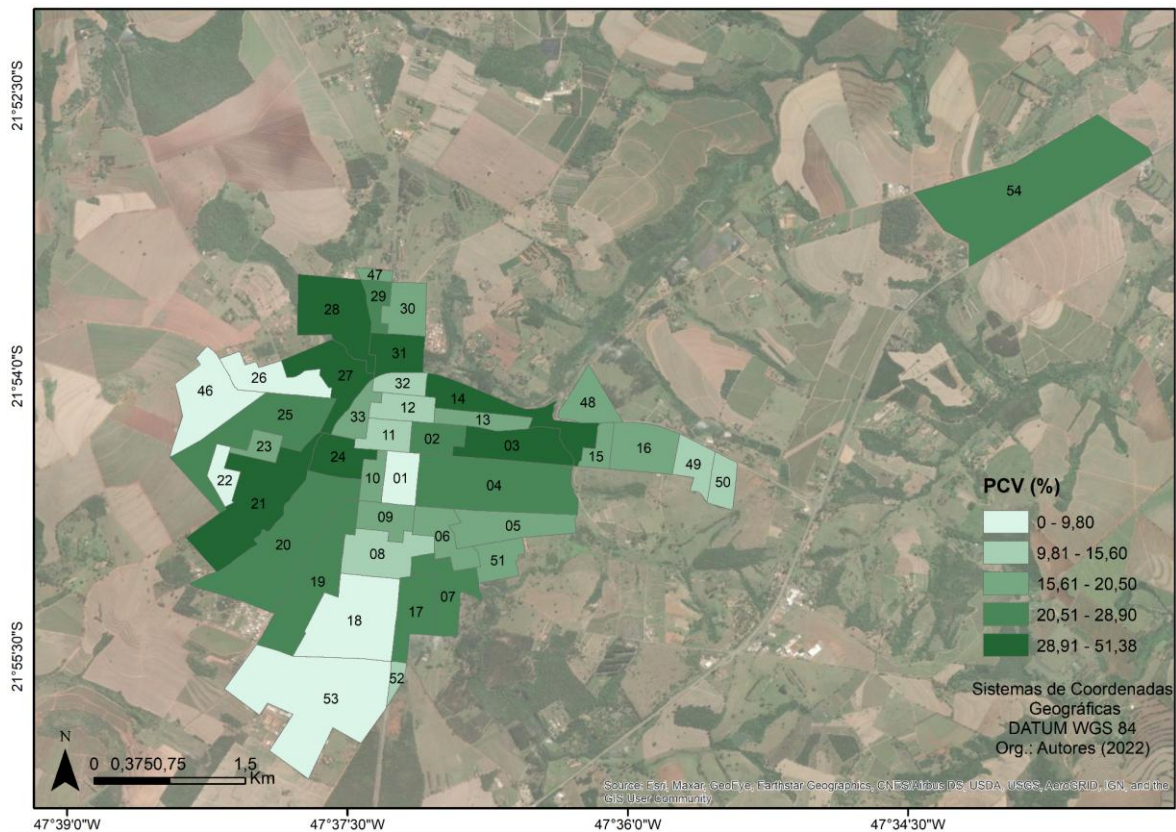
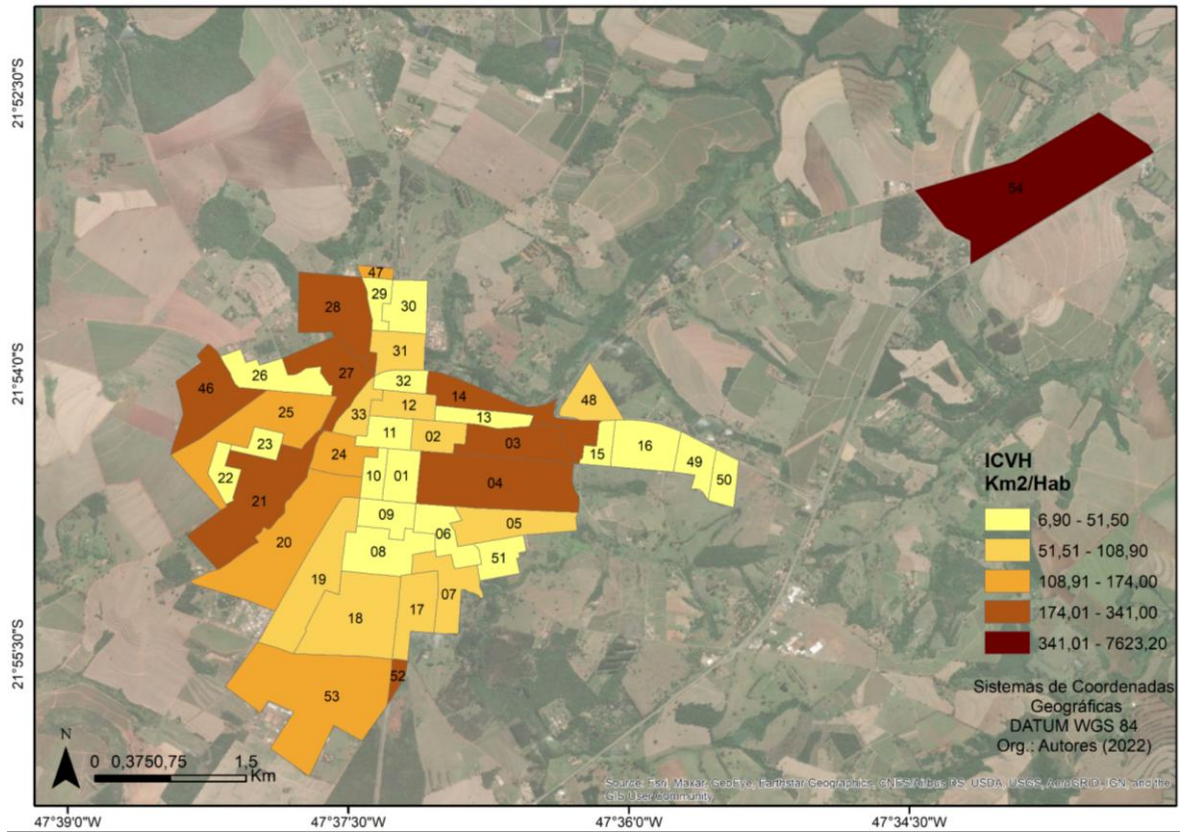
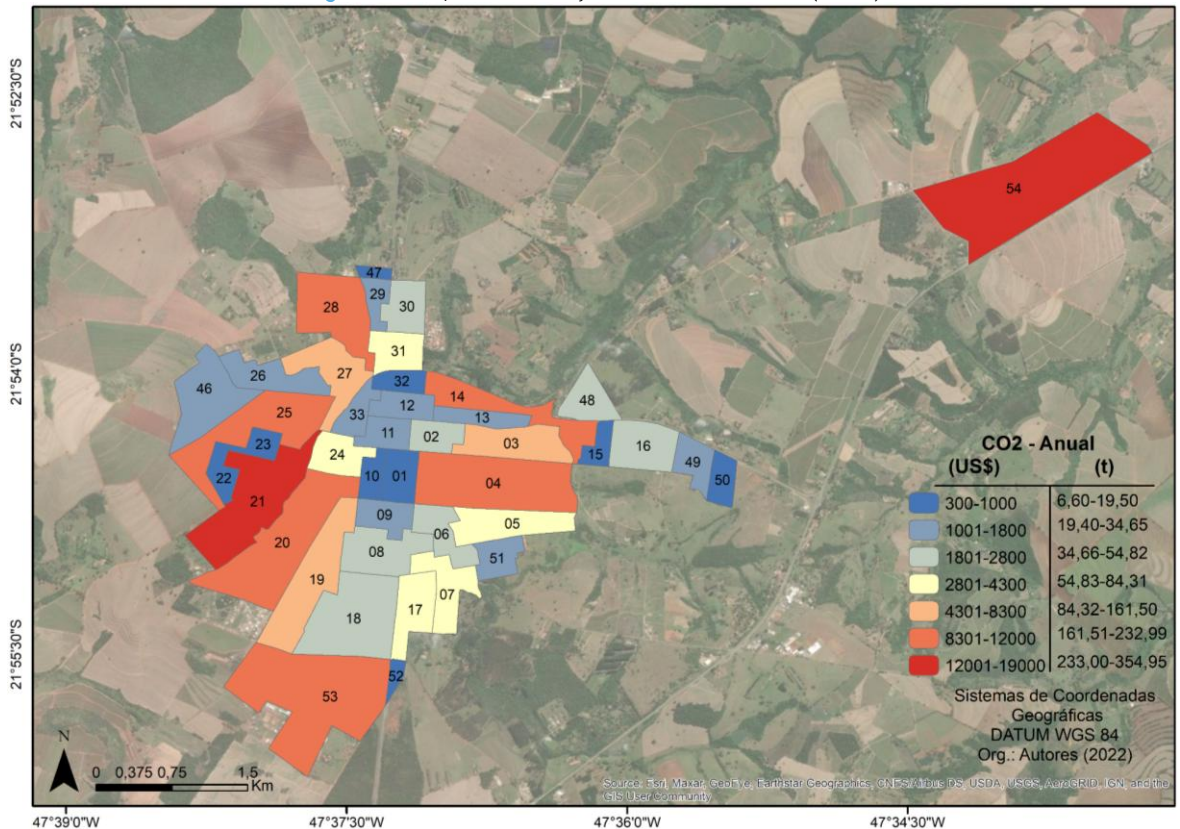


Figura 6 – Mapa de ICVH em Descalvado-SP



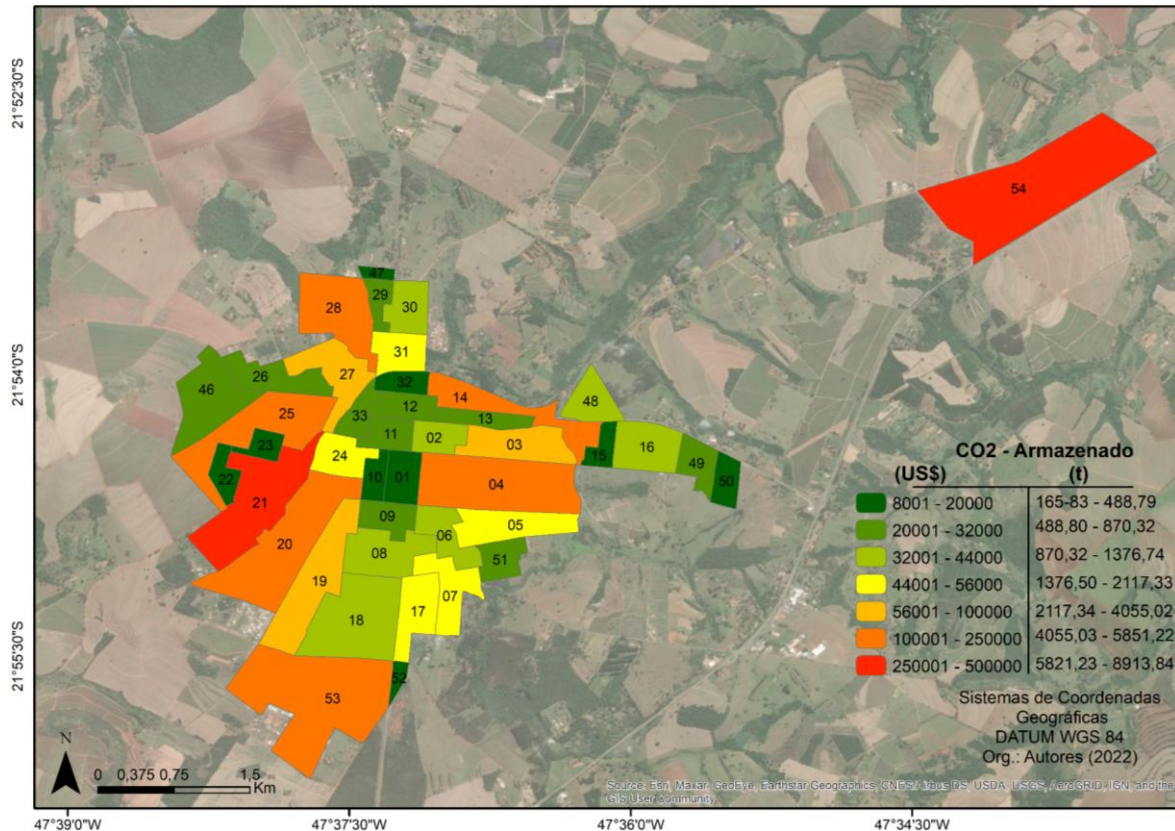
Fonte: AUTORES, 2023.

Figura 7 - Mapa de Valoração Ambiental de CO₂ (anual)



Fonte: AUTORES, 2023.

Figura 8 - Mapa de Valoração Ambiental de CO₂ (armazenado)



Fonte: AUTORES, 2023.

Inicialmente, em relação à Figura 6 - referente ao PCV em Descalvado, observa-se que setores censitários centrais apresentam baixos percentuais, como os setores 01 e 18, enquanto regiões periféricas apresentam índices maiores, como os setores 27 e 28. Dentre suas justificativas, destaca-se a supressão de áreas verdes em áreas historicamente ocupadas - enquanto setores censitários mais novos, vinculados ao Código Florestal Brasileiro, norteiam-se por políticas de regulação espacial e ambiental sustentáveis (MARICATO e COLOSSO 2020), visando a valorização financeira das regiões, prática comumente observada em loteamentos atuais. Especificamente, no município de Descalvado, os setores com índices de PCV maiores que 28% ou possuem APP em seu espaço, ou possuem loteamentos fechados.

No Estado de São Paulo, por exemplo, destaca-se o Programa Município Verde Azul, do ano de 2013 (SÃO PAULO, 2013), que tem como premissa fomentar ações que promovam a melhoria da qualidade ambiental de cada município, através incentivos fiscais e orçamentários em caso de melhoras de suas diretivas e, dentre essas, destaca-se a *arborização urbana* como elemento fundamental.

O mesmo observa-se em relação a Figura 6, voltada ao índice ICVH. Embora mediante metodologias e dados quantitativos diferentes do anterior, percebe-se que setores censitários com menor densidade populacional, atrelados à maior área de vegetação, formam maiores índices ICVH, como os setores 54, 46 e 21. Cabe ressaltar que estes números podem implicar em uma série de justificativas, como a arborização de vias, preservação de áreas de APP e mesmo ações antrópicas em menor escala e quantidade, que se colocam como fatores preponderantes para tais dados.

Por outro lado, os setores censitários centrais, como os 01, 09 e 10, com grande densidade populacional e/ou pouca área verde, demonstram números opostos ao debatido no parágrafo anterior. Essas condicionantes estão, muitas vezes, vinculadas a padrões urbanos e históricos de ocupação do espaço, uma vez que as regiões centrais historicamente são as primeiras a serem ocupadas no âmbito urbano (VILLAÇA, 1999), resultando em áreas concentradas e altamente povoadas, além de não possuírem regulação e gestão do espaço, crescendo muitas vezes de forma anárquica e sem regulação (KOWARICK, 1979), o que justifica a diminuição de áreas verdes nestas áreas.

Setores próximos aos de região central do município apresentam taxas de ICVH que variam entre 6 e 20,50 hab/km², enquanto outras mais periféricas - ou ao menos não em regiões centrais - têm taxas que passam de 174 hab/km², chegando a 7623,20 hab/km². Especificamente, o setor censitário a nordeste possui um índice maior por ser um bairro industrial que, como o próprio nome supõe, não possui alta densidade populacional - o que justifica o elevado ICHV. Curiosamente, o bairro industrial que possui elevado ICVH não possui um índice de vegetação tão elevado, justificado pelos próprios processos de instalação e implementação de atividades industriais na área.

Analiticamente, o mesmo ocorre quando observamos a Figura 7, que demonstra a valoração ambiental e sua relação dólar/tonelada, usando como escala temporal o período de um ano. Setores censitários como o número 01 e 10, localizados na região central, possuem baixas taxas de valoração, seja do ponto de vista financeiro, seja pelo ponto de vista de tonelada armazenada. Por outro lado, setores como os números 53 e 54, em regiões periféricas do município, apresentam elevadas taxas. Paralelamente, se as mesmas taxas - mas analisadas de modo armazenado, como a Figura 8 - demonstra, essas constatações permanecem, embora com escalas de grandezas maiores. Os mesmos setores supracitados, se observados, de modo sintomático, apresentam as mesmas particularidades, onde setores centrais detêm menores taxas armazenadas, enquanto os periféricos apresentam maiores.

Do ponto de vista financeiro, essas duas metodologias podem representar, sob uma perspectiva monetária, importantes valores, uma vez que esses números são significativos como, por exemplo, a estimativa de CO₂ armazenada, que passa de 4 milhões de dólares, o que pode fomentar tomadas de decisões, mitigar riscos e reduzir impactos (ROMERO *et al.* 2020), além de, sob outra perspectiva, atribuir preços a recursos e elementos naturais (VARGAS, ERAZO, DIAS, 2020), demonstrando a importância de serviços ecossistêmicos para o espaço natural e antrópico.

Em um cenário em que as ações antrópicas intensificam os impactos socioambientais, econômicos e climáticos, esses dados indicam áreas em que se pode aferir maior ou menor remoção de CO₂, bem como locais com maior potencial de valoração ambiental, com base nos dados produzidos.

Por fim, observa-se uma grande heterogeneidade em relação aos setores censitários municipais de Descalvado, independentemente da metodologia utilizada para mensuração destes dados. Contudo, os setores com mais concentração populacional sempre apresentam baixos índices de valoração, enquanto áreas com menos concentração e/ou APP demonstram o oposto. Condicionantes de ocupação histórica, assim como legislações urbanas e ambientais passam a fomentar a preservação de áreas verdes, conforme amplamente discutido pelos autores trazidos a discussão ao longo deste trabalho - como Santos (1996), Maricato e Colosso (2020), Villaça (1999), dentre outros.

Estes dados reforçam a proposição que foi trazida por Rolnik (2015), Santos (1996) e Maricato e Colosso (2020), na qual áreas consolidadas do ponto de vista urbanístico não representam,

necessariamente, ampla cobertura de áreas verdes e elevadas taxas de PCV e ICVH. Além disso, verifica-se que, apesar das problemáticas em relação a questões regulatórias e legislativas enfrentadas ao longo do século XXI, o Plano Diretor e os demais instrumentos urbanísticos presentes no Estatuto da Cidade (Brasil, 2001) podem contribuir para a efetivação de políticas públicas, como a arborização urbana. No que tange à transversalidade entre as questões regulatórias e a disponibilidade de instrumentos urbanísticos que beneficiem a população e o espaço urbano de forma equitativa, podem ser mencionados estudos similares que avaliam e espacializam a sustentabilidade urbana (OLIVATTO e DI LOLLLO, 2022), a cobertura do serviço de saneamento básico (CRISPIM *et al.*, 2016), a existência de rampas de acessibilidade em calçadas (OLIVATTO, INGUAGGIATO e MELANDA, 2022) e a vulnerabilidade a movimentos de massa (ESPÍNDOLA MOUSSA, NUNES FRANCISCO e DA ROSA, 2023).

Conclusões

A ferramenta i-Tree Canopy se mostrou rápida e eficiente na quantificação e valoração dos serviços ecossistêmicos referentes à qualidade do ar, apresentando ainda como vantagens o fato de ser completamente remota e dispensar recursos humanos especializados. Apesar disso, foram identificadas algumas limitações que, dependendo da finalidade, podem ser relevantes.

A principal limitação encontra-se numa certa generalização da metodologia aplicada ao quantificar a remoção de poluentes ambientais. Para efeitos de cálculo, a ferramenta não diferencia as espécies que compõem a cobertura vegetal, não considera o estágio em que a mesma se encontra e nem o grau de salubridade. Desta forma, o i-Tree Canopy mostra-se mais apropriado quando o objetivo demanda uma análise mais simplificada, de viés estatístico. Contudo, quando a finalidade requer uma investigação de caráter técnico e preciso, a ferramenta ainda não oferece suporte para tal. Outra limitação se refere à dependência de disponibilização de imagens do Google Earth.

Apesar destas limitações, a metodologia empregada permitiu concluir que o serviço ecossistêmico de remoção de poluentes no Município de Descalvado, especificamente CO₂, atinge o valor monetário de aproximadamente 173,5 mil dólares anuais, totalizando uma remoção de cerca de 3.385 toneladas anualmente. A estimativa acumulada de CO₂ armazenado totaliza quase 85 toneladas, o que equivale a mais de 4 milhões de dólares.

Estes valores reforçam a importância dos instrumentos de estimativa e valoração de serviços ecossistêmicos para avaliação da função ambiental, social e econômica de áreas verdes. No que tange às áreas verdes inseridas no contexto urbano, resultados desta quantificação podem apoiar os esforços de sensibilização sobre a importância destas áreas para o bem-estar humano e suportar os processos de gestão e planejamento ambiental nas cidades. Embora este tipo de análise não seja utilizada com frequência no setor público, a valoração tem o potencial de viabilizar programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) e subsidiar a tomada de decisões de políticas públicas.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – N° do processo 88887.658530/2021-00.

Referências

- BRASIL. *Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979*. Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 19 dez. 1979. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm. Acessado em: 10 de fev. de 2025.
- BRASIL. *Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001*. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acessado em: 02 de fev. 2025.
- BRASIL. *Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012*. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 28 maio 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acessado em: 02 de fev. 2025.
- CONSTANTINO, M.A.; GRZEBIELUCKAS, C.; COSTA DOS SANTOS, J.S.; DA COSTA NASCIMENTO, A.R.; RIBEIRO, M.R. Valoração Atribuída aos Serviços Ambientais de Acordo com os Diferentes Métodos: um Estudo no Período de 2005 a 2015. *Desenvolvimento em Questão*, v. 16, n. 44, 2018, p. 168-191. DOI: 10.21527/2237-6453.2018.44.168-191
- COSTANZA, R.; GROOT, R.; BRAAT, L.; KUBISZEWSKI, I.; FIORAMONTI, L.; SUTTON, P.; FARBER, S.; GRASSO, M. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?. *Ecosystem Services*, v. 28, n. A, 2017, p. 1-16. DOI: 10.1016/j.ecoser.2017.09.008
- CRISPIM, D. L.; RODRIGUES, R. S. S.; VIEIRA, A. S. de A.; SILVEIRA, R. N. P. de O.; FERNANDES, L. L. Spatialization of service coverage of sanitation basic and of human development index of municipalities the Marajó, Pará. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 11, n. 4, p. 112–122, 2016. DOI: 10.18378/rvads.v11i4.4507
- DA SILVA, A.D.P.; DOS SANTOS, A.F.; DE OLIVEIRA, L.M. Índices de área verde e cobertura vegetal das praças públicas da cidade de Gurupi, TO. *Floresta*, v. 46, n. 3, 2016, p. 353–361. DOI: 10.5380/rf.v46i3.40052
- DE ARRUDA, L.E.V.; SILVEIRA, P.R.S.; VALE, H.S.M.; DA SILVA, P.C.M. Índice de área verde e de cobertura vegetal no perímetro urbano central do município de Mossoró, RN. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 8, n. 2, 2013, p. 13-17.
- ENDRENY, T.; SANTAGATA R.; PERNA, A.; DE STEFANO, C.; RALLO, R.F.; ULGIATI, S. Implementing and managing urban forests: A much needed conservation strategy to increase ecosystem services and urban wellbeing. *Ecological Modelling*, v. 360, 2017, p. 328–335. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2017.07.016
- ESPÍNDOLA MOUSSA, L.; NUNES FRANCISCO, C.; DA ROSA, F. B. Análise socioespacial da população atingida por movimentos de massa na periferia da região metropolitana do Rio de Janeiro. *GEOgraphia*, v. 25, n. 54, 2023. DOI: 10.22409/GEOgraphia2023.v25i54.a50080
- FUNDAÇÃO SEADE – Sistema Estadual de Análise de Dados. *Perfil dos Municípios Paulistas*. São Paulo, 2022. Disponível em: <http://perfil.seade.gov.br/>. Acessado em: 30 de jul. de 2022.
- GARCIA, C.S.G.; PAIVA, P.D. de O.; BRUCK, J.; SOUSA, R. de B. Distribuição das áreas verdes públicas: análise comparativa entre cidades em diferentes países. *Ornamental Horticulture*, v.27, n. 1, 2021, p. 8-19. DOI: 10.1590/2447-536X.v27i1.2151
- HILBERT, D. R.; ROMAN, L. A.; KOESER, A. K.; VOGT, J.; VAN DOORN, N. Urban tree mortality: A literature review. *Arboriculture & Urban Forestry*, v. 45, n. 5, p. 167-200, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.48044/jauf.2019.015>. Acessado em: 11 jan. 2025.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Censo Brasileiro de 2010*. 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/descalvado/panorama>. Acessado em: 11 jan. 2021.

- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *IBGE - Cidades*. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/descalvado/panorama>. Acessado em: 20 dez. 2023.
- JENSEN, J. R. Sensoriamento remoto do ambiente. São José dos Campos: Parêntese Editora, 2009.
- JIM, C.Y. Tree-canopy characteristics and urban development in Hong Kong. *The Geographical Review*, v.79, n.2, 1989, pp. 210-255.
- KOWARICK, L. *A espoliação urbana*. Rio de Janeiro: Paz e Terra. 1979.
- MARICATO, Ermínia; COLOSSO, Paolo. As cidades são centrais para o bem-estar social: especificidades da produção do espaço urbano no Brasil. In: *Brasil, estado social contra a barbárie*. Org.: CASTRO, J.A.; POCHMANN, J. p. 277-300, 2020.
- MORIGI, J.B.; BOVO, M.C. A qualidade do ambiente urbano: uma breve reflexão sobre a ocorrência de espécies frutíferas na arborização das vias públicas do centro urbano de Mamborê (PR). In: *Anais do II Simpósio de Estudos Urbanos*. Campo Mourão: Universidade Estadual do Paraná, 2013.
- NOWAK, D. J. *et al.* Measuring and analyzing urban tree cover. *Landscape and Urban Planning*, v. 36, n. 1, p. 49–57, 1 out. 1996. DOI: 10.1016/S0169-2046(96)00324-6
- NOWAK, David J.; GREENFIELD, Eric J. Declining urban and community tree cover in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 32, p. 32-55, 2018. DOI: 10.1016/j.ufug.2018.03.006
- OLIVEIRA, H.H. Proposta de criação e caracterização da Área de Proteção Ambiental de Descalvado - SP. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1995, 140 p.
- OLIVATTO, T.F.; INGUAGGIATO, F.F.; MELANDA, E.A. Análise exploratória das rampas de acessibilidade nas calçadas dos municípios do estado de São Paulo. *Revista geografar*, v. 17, n. 1, p. 231-248, 2022. DOI: 10.5380/geografar.v17i1.79675
- OLIVATTO, T. F.; DI LOLLO, J. A. Urban Sustainable Development Index: a geospatial approach to add Tree Cover to HDI in São Paulo City. *Sociedade & Natureza*, v. 34, n. 1, 2022. DOI: 10.14393/SN-v34-2022-63819
- OLIVATTO, T.F.; STANGANINI, F.N.; MELANDA, E.A.; Métodos de estimativa de porcentagem de cobertura arbórea urbana: um estudo comparativo no Parque Ibirapuera. In: *Anais do II Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana*. São Paulo: Blucher, 2019, p. 489-497. DOI: 10.5151/singeurb2019-68
- PARMEHR, E. G. *et al.* Estimation of urban tree canopy cover using random point sampling and remote sensing methods. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 20, p. 160–171, 1 dez. 2016. DOI: 10.1016/j.ufug.2016.08.011
- ROMERO, C.; ARANCIBIA-AVILA, P.; AMÉSTICA-RIVAS, L.; TOLEDO-MONTIEL, F.; FLORES-MORALES, G. Economic valuation of the eco-systemic benefits derived from the environmental asset lake Laguna Santa Elena, through the multi-criteria analysis. *Brazilian Journal of Biology*, v. 80, n.3, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1519-6984.216218>
- ROLNIK, R. *Guerra dos lugares: a colonização da terra e da moradia na era das finanças*. São Paulo: Boitempo, 2015.
- SANTOS, Milton. *A natureza do espaço*. São Paulo: Hucitec, 1996.
- SÃO PAULO (Estado). *Programa Município VerdeAzul*. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2013. Disponível em: <https://www.ambiente.sp.gov.br/municipioverdeazul/>. Acessado em: 02 de fev. 2025.
- SCHEUER, J. M.; NEVES, S. M. A. da S. Planejamento urbano, áreas verdes e qualidade de vida. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, v. 11, n. 05, p. 74–89, 2016. DOI: 10.22292/mas.v11i05.587
- SBAU - SOCIEDADE BRASILEIRA DE ARBORIZAÇÃO URBANA. "Carta a Londrina e Iporã". *Boletim Informativo*, v. 3, n. 5, p. 3, 1996.
- SKORUPA, L. A.; SAITO, M. L.; NEVES, M. C. Indicadores de cobertura vegetal. In: *Indicadores de sustentabilidade em agroecossistemas*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2003. p. 162.
- SOUZA, M.L. *Mudar a Cidade: Uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanos*. 13º ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil. 2020.
- USDA FOREST SERVICE. *i-Tree Canopy Technical Notes*. 2021. Disponível em: <https://www.itreetools.org/support/resources-overview/i-tree-methods-and-files>. Acessado em: 18 mar. 2021.

VARGAS, A.; ERAZO, J.P.S.; DIAS, D. Has Cost Benefit Analysis Improved Decisions in Colombia? Evidence from the Environmental Licensing Process. *Ecological Economics*, v. 178, 2020. DOI: 10.1016/j.ecolecon.2020.106807

VILLAÇA, F. Uma contribuição para a história do planejamento urbano no Brasil. In: DÈAK, C; SCHIFFER, S.R (Orgs). *O processo de urbanização no Brasil*. São Paulo: Edusp,1999.