



Dimensionamento do espaço de crescimento de árvores urbanas como suporte ao planejamento de calçadas arborizadas

Urban tree growth space sizing to support tree-sidewalk planning

Dimensionamiento del espacio de crecimiento de árboles urbanos para apoyar la planificación de aceras

Jéssica Batista da Mata

Mestre em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil
jessicabdamata@yahoo.com.br

Daniela Sanson

Mestre em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil
danyela_sanson@hotmail.com

Fabiane Aparecida de Souza Retslaff

Professora Doutora, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil
faretslaff@gmail.com

Rogério Bobrowski

Professor Doutor, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Brasil
rogerio@unicentro.br



RESUMO

O estudo do espaço que as árvores urbanas necessitam para crescer e alcançar seu máximo potencial é importante para o planejamento urbano, a fim de reduzir conflitos com as infraestruturas construídas e permitir boas práticas de manejo das árvores. Esta pesquisa averiguou métodos simples e práticos para estimativa da área e volume de copa de duas espécies arbóreas plantadas em área urbana. A área de copa horizontal foi avaliada por meio de diferentes conjuntos de raios de copa (cardiais e colaterais), sendo 8, 4 e 2 raios. A área real de copa em projeção vertical foi determinada por meio da vetorização de duas fotografias da copa de cada árvore. Mensurações comumente realizadas a campo foram utilizadas para as estimativas, sendo diâmetro e altura de copa. Equações relacionadas a figuras geométricas (retângulo, elipse, círculo, triângulo e parábola) foram utilizadas para estimativa de área de copa vertical, bem como para o cálculo do volume hipotético de copa. Os resultados mostram que para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* plantados em área urbana, dois raios de copa são suficientes para estimativa da área de copa em projeção horizontal. A figura geométrica do triângulo foi a que permitiu melhor estimativa da área de copa vertical, dessa forma, a melhor maneira para estimar o volume de copa foi por meio da figura tridimensional do cone. Diante da escassez de orçamento público e da necessidade de otimizar recursos e pessoal, esses métodos demonstraram-se aplicáveis para auxiliar o processo de gestão da floresta urbana, por serem simples, práticos e confiáveis.

PALAVRAS-CHAVE: planejamento da floresta urbana. silvicultura urbana. copa de árvores urbanas.

ABSTRACT

*Studying the space that urban trees need to grow and reach their full potential is important for urban planning in order to reduce conflicts with built infrastructure and allow good tree management practices. This research investigated simple and practical methods for estimating the crown area and volume of two tree species planted in urban areas. We evaluated the horizontal crown by means of different sets of canopy radii (cardinal and collateral), being 8, 4 and 2 radii. The actual crown area in vertical projection was determined by the vectorization of two photographs taken from the crown. Measurements commonly performed in the field were used for the estimates, being diameter and crown height. Equations related to geometric figures (rectangle, ellipse, circle, triangle and parabola) were used to estimate vertical crown area, as well as to calculate the hypothetical crown volume. The results show that for *Handroanthus heptaphyllus* and *Platanus x acerifolia* planted in urban areas, two crown radius are allowed for the estimate of the crown area in horizontal projection. The triangle geometric figure was the one that allowed the best estimate of the vertical canopy area, thus, the best way to estimate the canopy volume was through the three-dimensional cone figure. Given the scarcity of public budget and the need to optimize resources and personnel, these methods have proven applicable to assist the urban forest management process, as they are simple, practical and reliable*

KEYWORDS: urban forest planning. urban forestry. urban tree crown.

RESUMEN

*Estudiar el espacio que los árboles urbanos necesitan para crecer y alcanzar su máximo potencial es importante para la planificación urbana a fin de reducir los conflictos con la infraestructura construida y permitir buenas prácticas de manejo de árboles. Esta investigación investigó métodos simples y prácticos para estimar el área y el volumen de la copa de dos especies de árboles plantados en áreas urbanas. El área horizontal del dosel se evaluó mediante diferentes conjuntos de radios de copa (cardinal y colateral), siendo 8, 4 y 2 radios. El área real de la copa en proyección vertical se determinó vectorizando dos fotografías de la copa de cada árbol. Las mediciones comúnmente realizadas en el campo se usaron para las estimaciones, siendo el diámetro y la altura de la copa. Las ecuaciones relacionadas con figuras geométricas (rectángulo, elipse, círculo, triángulo y parábola) se usaron para estimar el área vertical de la copa, así como para calcular el volumen hipotético de la copa. Los resultados muestran que para *Handroanthus heptaphyllus* y *Platanus x acerifolia* plantados en áreas urbanas, dos radios de copa son suficientes para estimación del área de copa en proyección horizontal. La figura geométrica del triángulo fue la que permitió la mejor estimación del área vertical de la copa, por lo que la mejor forma de estimar el volumen de la copa fue a través de la figura tridimensional del cono. Dada la escasez de presupuesto público y la necesidad de optimizar recursos y personal, estos métodos han demostrado ser aplicables para ayudar al proceso de manejo forestal urbano, ya que son simples, prácticos y confiables.*

PALABRAS CLAVE: planificación forestal urbana. silvicultura urbana. copas de los árboles urbanos.



1. INTRODUÇÃO

Nos países em desenvolvimento, o processo de urbanização acarretou na expansão desordenada das cidades, sobressaindo-se as infraestruturas construídas, de tal modo que os valores ambientais foram deixados em segundo plano. A forma de reverter o processo histórico de problemas relacionados ao crescimento urbano é por meio do Plano Diretor dos municípios, que possibilita um planejamento futuro adequado e evidencia, dentre outras, as propostas de planejamento e incremento das áreas verdes para promoção da qualidade de vida das pessoas (GOMES; MORETTO, 2011; PINHEIRO et al., 2018).

Neste sentido, a floresta urbana desempenha um papel fundamental para qualificar o espaço no contexto do planejamento das cidades. A gestão dos espaços verdes urbanos, contemplando a seleção de espécies, o local de plantio, a densidade de plantas, entre outros fatores, influencia no potencial que as árvores têm para ofertar benefícios ambientais, estéticos e econômicos. Tal questão demonstra a importância do conhecimento técnico-científico por parte dos gestores urbanos, de forma que sejam profissionais capacitados e com conhecimento aprofundado sobre o crescimento das árvores no ambiente urbano, bem como, que estejam aptos a elaborar estratégias que permitam a floresta urbana atingir o máximo desempenho (PRETZSCH et al., 2015; ANGULURI; NARAYANAN, 2017).

Muito se estuda sobre os benefícios ofertados pelas árvores nas calçadas, todavia quando se trata de planejamento e gestão das árvores, as informações são escassas. Dessa forma, torna-se importante a oferta de ferramentas que possam ajudar a coleta de informações para a gestão da floresta urbana, a fim de atender as metas do Plano Diretor de Arborização Urbana do município (ROY et al. 2012; VOGT et al. 2015; PINHEIRO et al., 2018).

Dependendo do objetivo, a quantidade de dados a serem coletados na floresta urbana pode ser grande (BOBROWSKI, 2011). Da mesma forma, nenhum dos conjuntos de dados abrangerá suficientemente todas as informações potenciais a serem incluídas nos bancos de dados, o que implica na necessidade de estimativas da mensuração das árvores urbanas para representar a população arbórea total (EKKEL; VRIES, 2017). Assim, os bancos de dados eficientes são aqueles representativos de toda a cidade, obtidos por meio de mensurações práticas de serem tomadas a campo e com potencial de englobar o máximo de informações úteis e necessárias para o planejamento correspondente, pelos órgãos gestores.

O planejamento da arborização de uma cidade deve promover a melhor interação entre os **espaços** disponíveis para plantio e as escolhas das espécies de árvores (URBAN, 2008), pois assim diminuirá os impactos da arborização sobre as infraestruturas pré-existentes, bem como reduzirá conflitos futuros que podem resultar em prejuízos (PINHEIRO et al., 2018).

Dentro desse contexto, salienta-se a importância da análise individualizada das árvores porque cada indivíduo determina maior ou menor grau de ocupação do espaço, principalmente nas calçadas (BOBROWSKI; LIMA NETO; BIONDI, 2013; PRETZSCH, 2015). Por outro lado, os dados sobre o tamanho que determinada espécie arbórea poderá ter na fase adulta são escassos e

sem padronização, pois pode variar de acordo com a espécie e região de plantio, o que demonstra ser necessária a coleta específica dessas informações (MCPHERSON et al., 2016).

O conhecimento sobre o tamanho máximo que determinada espécie arbórea poderá atingir ao longo dos anos dará suporte aos gestores para gerirem de forma eficaz o espaço necessário para plantio em áreas urbanas (MCPHERSON et al., 2016). Esta questão requer informações detalhadas sobre a dinâmica e o crescimento da grande diversidade de árvores urbanas e outras características sobre o crescimento delas ao longo dos anos, para assim definir o espaço certo para a árvore certa, de forma a evitar um futuro com transtornos devido a conflitos e manutenções recorrentes (FERRINI; FINI, 2011).

Para atender a estas preocupações do uso de informação de crescimento das árvores e dos espaços disponíveis, Pretzsch et al. (2015) citam a importância de responder questões como qual o tamanho que a árvore terá em área de copa em determinado tempo e local? Quais serão as necessidades de espaço que envolvem largura e volume de copa? Qual o potencial de resfriamento dessa árvore em determinada área sombreada? Qual é a diferença entre duas diferentes espécies neste quesito?

Por fim, ressalta-se que o planejamento e o manejo efetivo das árvores urbanas, visando promover os serviços ecossistêmicos almejados, dependem do conhecimento detalhado da forma como as árvores crescem no ambiente urbano (VOGT et al., 2017).

2. OBJETIVOS

O objetivo desta pesquisa foi determinar e testar métodos simples e práticos para a coleta de informações sobre o dimensionamento de espaço de crescimento de *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos (ipê roxo) e *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. (plátanos) utilizadas em diferentes tipologias da floresta urbana.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A pesquisa foi realizada com dados da floresta urbana do município de Irati, o qual está localizado na região Centro-Sul do Estado, a 156 Km da capital Curitiba, entre as coordenadas 25°27'56" de latitude Sul e 50°37'51" de longitude Oeste, no segundo Planalto Paranaense. A floresta urbana da cidade apresenta-se caracterizada em diferentes tipologias, com árvores de espécies nativas e exóticas nas praças, na arborização de calçadas, nos jardins particulares e no único parque público.

Os dados da pesquisa foram coletados durante os meses de janeiro a março de 2018 e correspondem a 30 árvores de *Handroanthus heptaphyllus* (Ipê-roxo) presentes na arborização de calçadas da Rua da Liberdade, em duas quadras sinuosas, e 30 árvores de *Platanus x acerifolia* (plátano) na arborização do único parque da cidade, o Parque Aquático, ao redor do lago. Os

indivíduos arbóreos estavam sob condições semelhantes de plantio, livres de concorrência com outras árvores, em pleno crescimento e sem histórico de interferência por poda.

As avaliações realizadas serviram para compreender como pode se dar a ocupação espacial da copa das árvores, a fim de propor meios simples e práticos para coletas e análises em inventários florestais urbanos. Informações sobre o espaço tridimensional ocupado pelas árvores urbanas auxiliam o processo de planejamento e gestão nos Planos Diretores de Arborização, visando a redução de conflitos com infraestruturas urbanas ao longo dos anos de crescimento das árvores.

3.2 Determinação da área de copa em plano horizontal

A área de copa das árvores, em projeção horizontal, foi determinada a partir da mensuração de oito raios (r) de projeção de copa na direção dos pontos cardeais e colaterais: norte (N), nordeste (NE), leste (L), sudeste (SE), sul (S), sudoeste (SO), oeste (O) e noroeste (NO). Para mensurar cada raio considerou-se uma linha desde o centro do tronco até o perímetro da projeção máxima da copa. As oito medidas foram realizadas com uma trena a laser (Leica Disto A5, Leica), a fim de obter uma representação da projeção de copa mais próxima da real.

Este procedimento foi adotado para comparar estimativas entre três métodos de determinação da área de copa em plano horizontal: Método um, utilizando dois raios (N e S); Método dois, utilizando quatro raios (N, S, L e O); e Método três, utilizando oito raios de copa (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO). O objetivo desta comparação foi averiguar se existia diferença significativa entre métodos para conciliar praticidade de coleta de dados a campo e exatidão na estimativa de área de copa, dada a escassez de recursos públicos e pessoal para a realização de inventários da floresta urbana.

Os raios médios de copa (\bar{r}) foram determinados por meio da média quadrática dos raios mensurados (Equação 1), para que se reduzissem os erros associados à determinação da área de copa a partir o raio médio (PRETZSCH et al., 2015).

$$(1) \quad \bar{r} = \sqrt{\frac{r_1^2 + r_2^2 + \dots + r_n^2}{n}}$$

Em que:

\bar{r} = raio médio da projeção da copa (m); r = raio de projeção de copa (m); n = número de raios mensurados

Com a média quadrática dos raios (Equação 1) realizou-se as estimativas de área de copa em projeção horizontal, sendo ACh_8 – área de copa calculada pela média de oito raios de copa (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO); ACh_4 – área de copa calculada pela média de quatro raios de copa (N, L, S e O); e ACh_2 – área de copa calculada pela média de dois raios de copa (N-S) (Equação 2).

$$(2) \quad ACh_n = \pi \cdot (\bar{r})^2$$

Em que:

ACh = área de copa horizontal (m^2); \bar{r} = raio médio da projeção da copa (m); n = número de raios mensurados.

Para definir quais os dois raios de copa deveriam ser selecionados para proporcionar a melhor estimativa em ACh_2 , comparou-se os raios cardeais individuais (N, S, L e O) e os conjuntos dos mesmos (N-S, L-O, N-L, S-O, N-O e S-L), por meio de procedimento estatístico definido em seção a seguir.

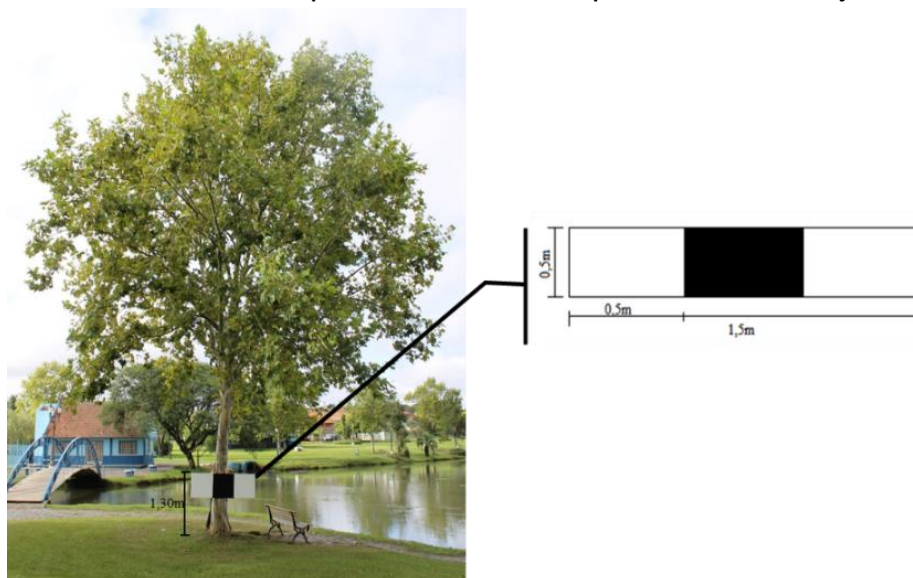
3.3 Determinação da área de copa em plano vertical

Neste procedimento, a área de copa em projeção vertical foi determinada a partir da vetorização de imagens (área real) e de equações que estimam a área de figuras geométricas planas (área estimada).

A área real de projeção vertical foi determinada a partir de duas fotografias, perpendiculares entre si, obtidas com uma câmera Canon Rebel EOS® a uma distância (d) das árvores, controlada entre 15 e 20 metros para minimizar erros, de forma que toda a área da copa fosse enquadrada no visor da câmera. Adaptando-se a metodologia de Durlo et al. (2004), utilizou-se uma escala de 1,5 m x 0,5 m, dividida em faixas longitudinais de 0,5 m (Figura 1), em branco e preto, fixada em alinhamento perpendicular ao tronco, a 1,30m de altura (DAP).

As imagens obtidas foram processadas no *software* ImageJ 1,51 j8, mediante calibração a partir das medidas conhecidas da escala (Figura 1) e vetorização das copas para determinação da área real da copa em projeção vertical.

Figura 1: Dimensões da escala acoplada ao tronco das árvores para auxiliar as mensurações da copa



Fonte: os autores (2019)

A área de copa em projeção vertical foi estimada por meio de equações de cinco figuras geométricas (Quadro 1), a partir de variáveis dendrométricas obtidas a campo. A altura da

árvore (h) e altura de copa (h_{cp}) foram obtidas com um Clinômetro Haglöf. O diâmetro de copa (D_{cp}) foi obtido por meio de duas vezes o raio de copa, calculado com a média quadrática de oito raios. Os dados das áreas de copa, real e das figuras geométricas, foram comparados por meio de procedimento estatístico definido em seção a seguir, a fim de saber se a área de copa determinada por um procedimento simples seria significativamente diferente do valor real.

Quadro 1: Equações de sólidos geométricos para estimativa de área e volume de copa das árvores

Figura de representação geométrica da copa	Equação para área	Equação para volume
Retângulo – Paralelepípedo	$A_{cp_{retângulo}} = h_{cp} \cdot D_{cp}$	$V_{cp_{paralelepípedo}} = D_{cp_{NS}} \cdot D_{cp_{LO}} \cdot h_{cp}$
Elipse – Elipsoide	$A_{cp_{elipse}} = \pi \cdot \frac{h_{cp}}{2} \cdot \bar{r}_8$	$V_{cp_{elipsoide}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D_{cp_{NS}}}{2} \cdot \frac{D_{cp_{LO}}}{2} \cdot \frac{h_{cp}}{2}$
Círculo – Esfera	$A_{cp_{círculo}} = \pi \cdot \bar{r}_8^2$	$V_{cp_{esfera}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \bar{r}_8^3$
Triângulo – Cone	$A_{cp_{triângulo}} = \frac{D_{cp} \cdot h_{cp}}{2}$	$V_{cp_{cone}} = \frac{\pi}{3} \cdot \bar{r}_8^2 \cdot h_{cp}$
Parábola – Parabolóide	$A_{cp_{parábola}} = \frac{2}{3} \cdot D_{cp} \cdot h_{cp}$	$V_{cp_{parabolóide}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \bar{r}_8^2 \cdot h_{cp}$

Nota: A_{cp} = área de copa (m^2); h_{cp} = altura de copa (m); D_{cp} = diâmetro de copa (m); \bar{r}_8 = média de 8 raios da projeção da copa (m); V_{cp} = volume de copa (m^3).

3.4 Determinação do volume de copa

Para cada uma das espécies, o volume de copa (V_{cp}) foi estimado por meio de equações de sólidos geométricos (Quadro 1), conforme sugerido por Ludwig et al. (1975), com a finalidade de demonstrar, de maneira prática e eficiente, o espaço tridimensional de ocupação das árvores na área urbana. Comparou-se as estimativas obtidas por meio de procedimento estatístico descrito em seção a seguir.

Considerando-se que a copa de uma árvore não é um sólido geométrico completo, a densidade de copa também foi calculada. Assim, para determinar o quanto de volume era correspondente ao conjunto de folhas e galhos (massa vegetal), foram tiradas quatro fotografias da copa, equidistantes em 90° , com a câmera a 40 cm do tronco, a 1,30 m de altura do solo e com o obturador posicionado no sentido vertical e direcionado para a base da copa.

As imagens obtidas foram processadas no *software* MultiSpec, por meio do algoritmo *Maximum Likelihood*, para classificação da massa vegetal (folhas e galhos) e espaços vazios (céu) presentes na copa das árvores. O valor médio da porcentagem de massa vegetal das quatro fotos, por árvore, foi utilizado para determinar o volume de copa (m^3) vazado de cada um dos indivíduos arbóreos.

3.4 Procedimentos de análise estatística

Para as análises comparativas dos métodos de determinação da área e volume de copa utilizou-se um Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), considerando cada árvore como um bloco. Esse delineamento foi utilizado porque as árvores de cada espécie estudada, apesar de estarem em uma mesma área, com condições ambientais semelhantes, podem sofrer influência local individual não controlável.

Quanto à área de copa em projeção horizontal, adotou-se três procedimentos de análise para conferir se havia diferença de projeção entre os eixos, o que poderia afetar as estimativas utilizando apenas dois raios de projeção de copa. No primeiro procedimento, os tratamentos foram os três métodos de estimativa de área de copa em projeção horizontal, sendo ACh_8 = área de copa determinada a partir de oito raios de projeção (cardeais e colaterais); ACh_4 = área de copa determinada a partir de quatro raios de projeção (cardeais); e ACh_2 = área de copa determinada a partir de dois raios de projeção (norte e sul). No segundo procedimento, os tratamentos foram quatro áreas de copa determinadas a partir de quatro raios de copa correspondentes aos eixos cardeais (N-S-L-O). No terceiro procedimento, os tratamentos foram seis áreas de copa determinadas a partir de seis médias de raios de copa correspondentes aos pares entre os eixos cardeais (N-S, L-O, N-L, S-O, N-O e S-L).

Quanto à área de copa em projeção vertical, os tratamentos foram os seis métodos de estimativa de área de copa correspondentes à área de copa real, calculada pela vetorização de fotografias, e área de copa estimada partir de equações de cinco figuras geométricas (retângulo, elipse, círculo, triângulo e parábola).

Quanto ao volume de copa, os tratamentos foram os cinco métodos de estimativa do volume de copa determinado a partir das equações de cinco sólidos geométricos (cone, paralelepípedo, esfera, parabolóide e elipsoide), pois não foi possível determinar o volume real da copa. Também se comparou, por meio de um teste t pareado, os valores do volume sólido e do volume vazado das copas.

Os dados de área de copa vertical e volume de copa foram transformados pelo método Box-Cox (BOX; COX, 1964) por não ser constatada homocedasticidade das variâncias dos erros. Após comprovada a homocedasticidade pelo teste de Bartlett, ao nível de 5% de probabilidade de erro, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) utilizando-se o software R Studio Version 1.0.136. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da área de copa em plano horizontal

Não foi constatada diferença significativa ($p > 0,01$) entre os métodos de determinação da área de copa em projeção horizontal utilizando dois, quatro ou oito raios de copa, tanto para

Handroanthus heptaphyllus quanto para *Platanus x acerifolia* (Tabela 1, Procedimento 1). A diferença entre os blocos corresponde às características de crescimento distintas entre as árvores, pois mesmo sendo locais com condições ambientais aparentemente homogêneas para cada grupo de árvores avaliado, pequenas variações nas condições individuais do solo (umidade, temperatura e outros), maior proximidade ao trânsito de pessoas ou veículos ou até mesmo vandalismo podem condicionar singelas diferenças na morfometria das árvores.

Quando utilizados os raios de projeção de copa correspondentes aos pontos cardeais (Tabela 1, Procedimento 2) e aos pares entre esses (Tabela 1, Procedimento 3), constatou-se haver diferença significativa entre a área de copa estimada, para ambas as espécies.

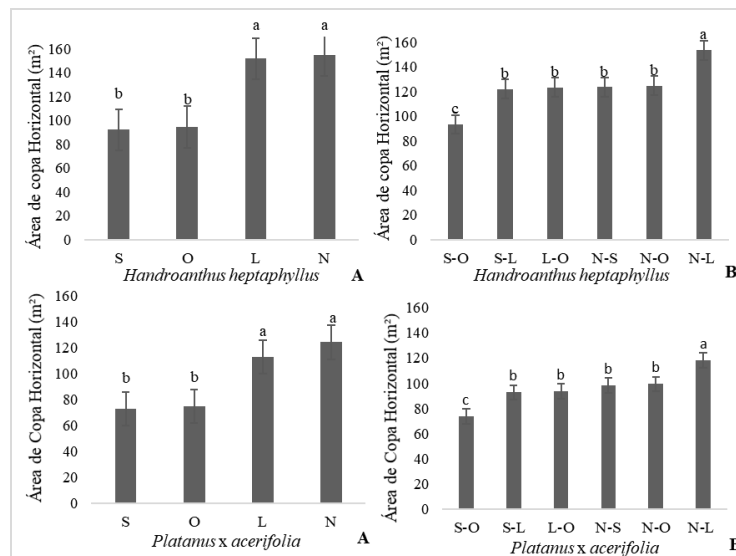
Por meio do teste de médias foi possível observar que as áreas de projeção de copa estimadas com os raios medidos no sentido Norte e Leste demonstram-se semelhantes entre si, da mesma forma que quando considerados os sentidos Sul e Oeste (Figura 2). Sendo assim, para as duas espécies avaliadas, a área de copa estimada com a média dos raios Norte/Leste se distingue significativamente da média dos raios Sul/Oeste, em que para a primeira condição há superestimava e para a segunda há subestimava da área de copa.

Tabela 1: Resumo da análise de variância dos diferentes procedimentos para estimativa de área de copa, em plano horizontal, para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*

<i>Handroanthus heptaphyllus</i>									
Fator de	Procedimento 1			Procedimento 2			Procedimento 3		
Varição	GL	QM	p-valor	GL	QM	p-valor	GL	QM	p-valor
Bloco	29	6266,8	2,00 ⁻¹⁶	29	7573	3,01 ⁻⁷	29	11360	2,20 ⁻¹⁶
Tratamento	2	1389,9	2,81 ⁻²	3	36089	1,42 ⁻⁹	5	10826,8	1,60 ⁻¹⁴
Resíduo	58	365,7		87	1897		145	569,1	
<i>Platanus x acerifolia</i>									
Fator de	Procedimento 1			Procedimento 2			Procedimento 3		
Varição	GL	QM	p-valor	GL	QM	p-valor	GL	QM	p-valor
Bloco	29	3643,4	2,20 ⁻¹⁶	29	4984,5	7,82 ⁻¹³	29	7477,8	2,20 ⁻¹⁶
Tratamento	2	150,1	1,02 ⁻¹	3	20570,1	4,94 ⁻¹³	5	6171	2,20 ⁻¹⁶
Resíduo	58	63,1		87	713,8		145	214,1	

Nota: Procedimento 1 (comparação entre 8, 4 ou 2 raios de copa), Procedimento 2 (comparação entre os eixos Norte, Sul, Leste e Oeste) e Procedimento 3 (comparação entre pares de eixos Norte/Leste, Sul/Oeste, Norte/Sul, Leste/Oeste, Norte/Oeste e Sul/Leste), GL (Grau de Liberdade), QM (Quadrado Médio)

Figura 2: Comparação de médias entre os métodos para estimativa da área de projeção de copa horizontal (m²) calculada com raios nas direções Norte, Leste, Oeste e Sul (A) e para a média com os raios Norte/Leste, Sul/Oeste, Norte/Sul, Leste/Oeste, Norte/Oeste e Norte/Leste (B)



Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Os resultados das comparações entre a extensão da copa nas direções cardeais (N, S, L e O) permitem afirmar que, tanto para *Handroanthus heptaphyllus* quanto para *Platanus x acerifolia*, o lado que abrange o Norte e o Leste cresce mais do que o lado Sul e Oeste. Portanto, as espécies avaliadas, com características morfológicas distintas, localizadas em diferentes tipologias da floresta urbana e em plantios não alinhados, demonstram semelhança no modo de expansão dos galhos nestas faces de exposição ao sol e, por consequência, na expressão da área de copa em projeção horizontal, a partir do eixo central correspondente ao tronco.

Por conta disso, a seleção de dois raios de copa tomados na posição N-S ou L-O permite obter a representação média da projeção da copa porque considera um raio do lado de menor crescimento (O ou S) e um raio do lado de maior crescimento (N ou L). Quando as projeções dos dois raios selecionados são em 180°, tal qual Norte-Sul ou Leste-Oeste, é possível obter estimativa da área de copa em plano horizontal semelhante às estimativas feitas com oito ou quatro raios (Tabela 1, Procedimento 1), o que pode auxiliar na redução do tempo de coleta de dados e custo do inventário da floresta urbana. Contudo, se forem selecionados os raios de projeção no sentido Norte-Leste poderá ocorrer superestimativa ou se selecionados aqueles no sentido Sul-Oeste poderá ocorrer subestimativa da área de copa, não representando a real projeção da copa no plano horizontal.

Costa et al. (2013), ao estudar a influência do número de raios de projeção na estimativa de área de copa em árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, do estrato dominante da floresta, sem competição de copas, constataram não haver diferença quando se considera quatro ou oito raios para as estimativas. No entanto, os autores argumentaram que pode ocorrer dois tipos de

erros nas estimativas de área de copa em projeção horizontal: o primeiro, relacionado à utilização da equação da área do círculo para o cálculo da área transversal, e o segundo, relacionado à seleção e quantidade dos raios mensurados a campo. Por conta disso, o método que considera oito raios de copa é considerado mais acurado (COSTA et al., 2013; ROSOT et al., 2014).

Nesta pesquisa, o primeiro erro foi minimizado porque os raios médios foram calculados a partir da equação da média quadrática e, apesar de não apresentar diferença significativa com a média aritmética, essa é uma maneira de reduzir os erros gerados no cálculo de área de copa, no qual se transforma o raio da projeção de copa em área transversal (PRESTZCH et al., 2015).

Essa metodologia pode ser aplicada pelos gestores da floresta urbana nos procedimentos de avaliação das árvores em inventários florestais urbanos, como meio de dar mais praticidade à obtenção de dados a campo, reduzindo custos e mão de obra, pois o método de coleta utilizando dois raios de copa demonstrou-se tão eficaz quanto aquele que considera o uso de oito raios para determinar a área de copa.

4.2 Determinação da área de copa em plano vertical

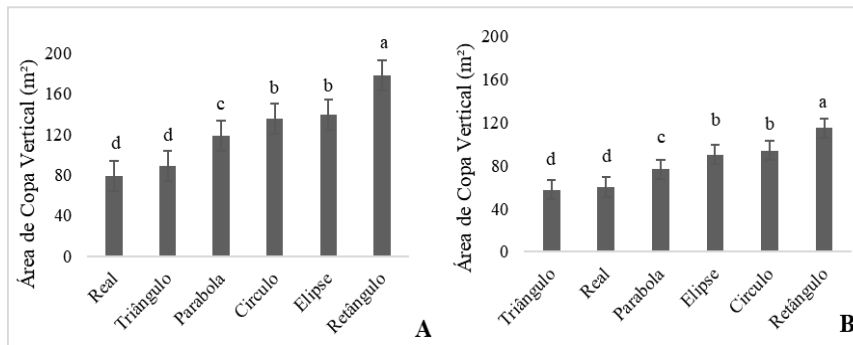
Para ambas as espécies se constatou diferença significativa entre os tratamentos avaliados (Tabela 2). A estimativa de área de copa em projeção vertical por meio da equação da área do triângulo foi a que mais se aproximou da área considerada real, determinada por vetorização de imagem (Figura 3), não havendo diferença significativa entre elas ($p > 0,05$). Porém, ocorreu pequena subestimativa de 4% para *P. acerifolia* e superestimativa de 13% para *H. heptaphyllus*. Da mesma forma que para a área de copa em projeção horizontal, a variação observada entre blocos se deve às diferentes formas de crescimento das árvores urbanas, que num mesmo ambiente podem responder de forma individual às interferências do meio urbanizado. Staudhammer et al. (2011) e Lawrence et al. (2012), afirmam que a forma com que as árvores crescem nas áreas urbanas pode variar entre indivíduos da mesma espécie e nas mesmas condições de clima, conforme características locais específicas, práticas silviculturais realizadas e propriedades do solo.

Tabela 2: Resumo da análise de variância dos diferentes procedimentos para estimativa de área de copa, em plano vertical, para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*

Fator de Variação	GL	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>			<i>Platanus x acerifolia</i>		
		QM	F	p-valor	QM	F	p-valor
Bloco	29	0,5338	47,1	$2,2 \times 10^{-16}$	57,243	111,57	$2,2 \times 10^{-16}$
Tratamento	5	1,56	137,41	$2,2 \times 10^{-16}$	161,09	313,97	$2,2 \times 10^{-16}$
Resíduo	145	0,011			0,513		

Nota: GL (Grau de Liberdade), QM (Quadrado Médio)

Figura 3: Comparação de médias entre os métodos para estimativa da área de projeção de copa vertical (m²) entre a figura real e as figuras geométricas, em árvores de *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR

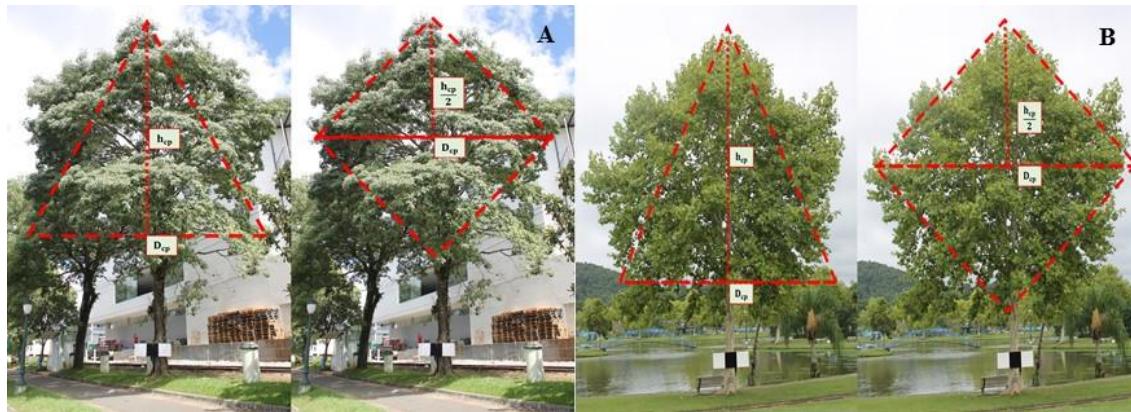


Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.

A justificativa para a melhor representação da área real de copa em projeção vertical por meio da figura geométrica do triângulo, que é estranho à representação da copa de ambas as espécies, está demonstrada na Figura 4. Quando se divide a altura total da copa em dois eixos de igual comprimento, de maneira que sejam obtidos dois triângulos análogos, de altura e base iguais, sendo a base do triângulo o diâmetro de copa, constata-se que a figura geométrica se encaixa quase que inteiramente na copa avaliada.

No presente estudo, as árvores de *Handroanthus heptaphyllus* tiveram diâmetro médio de copa de 12,90 m e altura de copa média de 13,30 m e *Platanus x acerifolia* apresentaram média de diâmetro de copa de 10,37 m e altura de copa igual a 10,76 m, ou seja, altura e diâmetro de copa médios muito próximos para ambas as espécies. Assim, pela classificação de Gerstenberg e Hofmann (2016) as copas possuem formato globular, e pela classificação de Iwasa et al. (1985) as copas possuem formato hemisférico. Porém, isto não deve ser um padrão de formato de copa a generalizar para ambas as espécies, por provir de valores médios das variáveis diâmetro e altura de copa e porque a maioria das árvores apresenta valores superiores ou inferiores à média para estas variáveis. Aceitar esta conformação da copa, a partir de valores médios, implicaria em contrapor o resultado obtido de que a figura geométrica do triângulo é a mais adequada para estimar a área de copa em plano vertical.

Figura 4: Ajuste da figura do triângulo com melhor conformação da área de projeção de copa vertical das árvores de *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR



Fonte: os autores (2019)

De acordo com Iwasa et al. (1985), a forma das copas das árvores é distinta e varia conforme o sítio de crescimento, assim, árvores que crescem em ambientes abertos e livre de concorrência tendem a ter uma copa com multicamadas devido à melhor eficiência fotossintética do indivíduo. Nestas condições, as árvores tendem a apresentar formato de copa hemisférica, semelhante a globulosa, sendo essa a melhor forma da árvore. Por outro lado, Gerstenberg e Hofmann (2016), ao estudar características de 24 espécies arbóreas para plantio em áreas urbanas, constataram que árvores com altura de copa maior que a largura da copa tendem a um formato oval, enquanto que árvores com base de copa maior que a altura de copa se enquadram em formato de coníferas.

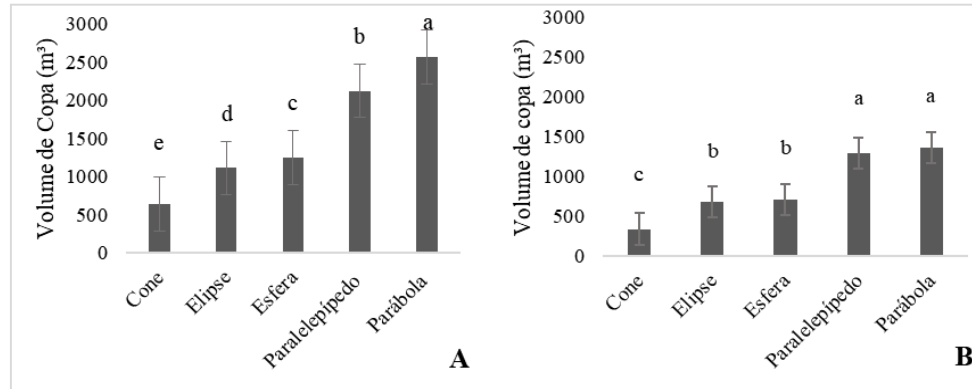
4.3 Determinação do volume de copa

Os volumes de copa estimados por meio das figuras de sólidos espaciais (paralelepípedo, elipsoide, esfera, cone e parabolóide) diferiram significativamente entre si (Figura 5), para ambas as espécies (p -valor = $2,2 \times 10^{-16}$).

A partir da constatação de que a figura geométrica do triângulo foi aquela que melhor se assemelhou à área de copa real em projeção vertical, para ambas as espécies, considerou-se o cone como figura espacial de referência para comparação com as demais formas geométricas, tendo em vista a impossibilidade de determinação do volume real de copa, com os dados coletados. Porém, nenhuma outra figura geométrica permitiu obter volumes de copa semelhantes àqueles calculados com a figura do cone.

Por meio da figura geométrica do parabolóide obteve-se o maior volume de copa, sendo quatro vezes maior do que o volume do cone tanto para *Handroanthus heptaphyllus*, quanto para *Platanus x acerifolia* (Figura 5).

Figura 5: Comparação de médias entre os métodos de estimativa volume de copa (m^3) em árvores de *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR



Nota: Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade de erro.

Ludwin et al. (1975), ao determinar a biomassa de árvores, estimaram o volume de copa de forma semelhante ao presente estudo, entretanto ajustaram visualmente a forma da copa à figura geométrica espacial que melhor se encaixava aparentemente à forma da copa. Isto também foi realizado por Yin et al. (2011), os quais utilizaram figuras geométricas diferentes, conforme a melhor adaptação da forma da copa, em diferentes espécies, dentre árvores e arbustos presentes na arborização de Shanghai, China.

Tais procedimentos não seriam adequados para o conjunto de dados do presente estudo, pois uma simples análise visual da superfície da copa em eixo vertical demonstra que as copas de ambas as espécies se conformam como esfera ou elipsoide, mas que essas figuras tridimensionais não mantêm correspondência com a figura geométrica que melhor representa a área de copa, em relação à área real estimada.

No cálculo da densidade de copa, foi possível constatar valores médios de 77% de densidade de copa para *H. heptaphyllus* e 91% para *P. acerifolia*, consideradas copas com densidade relativamente elevada. Tal fato pode justificar o motivo pelo qual a comparação entre volume sólido e volume vazado, por meio do teste t, não ter apresentado diferença significativa (*H. heptaphyllus*: $p = 0,1578$, *P. acerifolia*: $p = 0,4843$).

Das estimativas práticas de volume de copa, por meio de figuras geométricas sólidas, pode haver superestimativa de benefícios ambientais como a regulação do microclima, a interceptação da chuva ou o estoque de biomassa aérea se não é considerada a densidade da copa e a ponderação disso nas estimativas do volume, pois as copas das árvores constituem-se em estruturas vazadas, não sólidas.

Quanto à densidade de copa, de acordo com Tan et al. (2017), o efeito do resfriamento e a regulação térmica promovidos pela arborização nos grandes centros urbanos está relacionado à porcentagem de radiação que é obstruída pela copa das árvores. Portanto, espécies com maior densidade de copa nos períodos de verão são características almejadas, tais quais as do presente

estudo que podem ser árvores indicadas ao plantio na floresta urbana quando se tem por objetivo a regulação microclimática.

5. CONCLUSÕES

O conhecimento sobre como as árvores crescem nos centros urbanos é de grande importância para o planejamento do plantio e condução das árvores, principalmente diante de condições de plantio como as calçadas que se constituem em um dos ambientes mais restritivos à presença de árvores. Entretanto, as informações sobre o crescimento e o tamanho de um indivíduo arbóreo devem ser obtidas de forma simples e rápida para auxiliar o processo de gestão, otimizando-se recursos e pessoal diante da escassez de orçamento público.

A área de copa em projeção vertical, para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*, pode ser estimada com eficiência apenas pela mensuração de dois raios de copa, desde que tomados nas posições cardeais Norte-Sul, Norte-Oeste, Leste-Oeste ou Sul-Leste.

Quanto a estimativa da área de copa em projeção vertical, de forma simples e rápida, é aconselhável a utilização da equação referente a figura geométrica do triângulo, sendo essa tão adequada para estimar a área nesse plano quanto se as copas fossem vetorizadas por fotografias.

A equação do cone, figura com equivalência ao triângulo, demonstrou-se a mais eficiente para estimar volume hipotético da copa e assim fornecer a dimensão de ocupação tridimensional das árvores de ambas as espécies.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Coordenação Brasileira de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado paga ao primeiro autor.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULURI, R.; NARAYANAN, P. Role of green space in urban planning: outlook towards smart cities. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.25, n.1, p.58-65, 2017.

BOBROWSKI, R. Inventário florestal contínuo e dinâmica da arborização de ruas. In: BIONDI, D.; LIMA NETO, E. M. **Pesquisa em arborização de ruas**. Curitiba: O autor, 2011. p.91-110.

BOBROWSKI, R.; LIMA NETO, E. M.; BIONDI, D. Alterações na arquitetura típica de *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze na arborização de ruas de Curitiba, Paraná. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 3, p. 281 - 289, 2013.

BOX, G. E. P.; COX, D. R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**, v.26, n.2, p.211-243, 1964.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; CUNHA, T. A. Influência da posição social e do número de raios na estimativa da área de copa em araucária. **Floresta**, v.43, n.3, p.429-438, 2013.



- DURLO, M.A.; SUTILI, F.J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* Vellozo. **Ciência Florestal**, v.14, n.2, p.79-89, 2004.
- EKKEL, E.D.; DE VRIES, S. Nearby green space and human health: evaluating accessibility metrics. **Landscape and Urban Planning**, v.157, p.214–220, 2017.
- FERRINI, F.; FINI, A. Sustainable management techniques for trees in the urban areas. **Journal of Biodiversity and Ecological Sciences**, v.1, n.1, p.1-19, 2011.
- GERSTENBERG, T.; HOFMANN, M. Perception and preference of trees: A psychological contribution to tree species selection in urban areas. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.15, p.103-111, 2016.
- GOMES, C. S.; MORETTO, E. M. A framework of indicators to support urban green area planning: a Brazilian case study. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v.1, n.1, p.47-56, 2011.
- IWASA, Y. O. H.; COHEN, D. A. N.; LEON, J. A. Tree height and crown shape, as results of competitive games. **Journal of Theoretical Biology**, v.112, n.2, p.279-297, 1985.
- LAWRENCE, A. B.; ESCOBEDO, F. J.; STAUDHAMMER, C. L.; ZIPPERER, W. Analyzing growth and mortality in a subtropical urban forest ecosystem. **Landscape and Urban Planning**, v.104, n.1, p.85-94, 2012.
- LUDWIG, J. A.; REYNOLDS, J. F.; WHITSON, P. D. Size-biomass relationships of several Chihuahuan desert shrubs. **American Midland Naturalist**, v.94, n.2, p.451-461, 1975.
- MCPHERSON, E. G.; DOORN, N. S. V.; PEPER, P. J. **Urban Tree Database and Allometric Equations**. Albany: United States Department of Agriculture, 2016. 86 p.
- PINHEIRO, P. B. G.; BARCELLOS, A.; WOJCIKIEWICZ, C. R.; BIONDI, D.; BRUN, F. G. K.; MAZUCHOWSKI, J. Z.; LEAL, L.; MUCHAILH, M. C.; FERRONATO, M. L.; SCHARNIK, M.; CONTE, P. A.; SILVA, P. L.; BOBROWSKI, R.; ALQUINI, Y. **Manual para elaboração do plano municipal de arborização urbana**. 2. ed. Curitiba: Procuradoria Geral de Justiça, 2018. v. 1. 65p.
- PRETZSCH, H.; BIBER, P.; UHL, E.; DAHLHAUSEN, J.; RÖTZER, T.; CALDENTY, J.; KOIKE, T.; CON, T. CHAVANNE, A.; SEIFERT, T.; TOIT, B.; FARNDEN, C.; PAULEIT, S. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.14, n.3, p.466-479, 2015.
- ROSOT, M. A. D.; RADOMSKI, M. I.; MACHADO, N. C.; GARRASTAZU, M. C.; FRANCISCON, L. **Cadernos de geoprocessamento (6): roteiro prático para a representação da projeção de copas de árvores em SIGs**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. 7p.
- ROY, S.; J. BYRNE; C. PICKERING. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.11, n.4, p.351–363, 2012.
- STAUDHAMMER, C.; ESCOBEDO, F.; LAWRENCE, A.; DURYEA, M.; SMITH, P.; MERRITT, M. Rapid assessment of change and hurricane impacts to Houston's urban forest structure. **Arboriculture & Urban Forestry**, v.37, n.2, p.60-66, 2011.
- TAN, Z.; LAU, K. K.; NG, E. Planning strategies for roadside tree planting and outdoor comfort enhancement in subtropical high-density urban areas. **Building and Environment**, v.120, n.1, p.93-109, 2017.
- URBAN, J. **Up by roots: healthy soils and trees in the built environment**. Champaign: ISA, 2008.
- VOGT, J. GILLNER, S.; HOFMANN, M.; THARANG, A.; DETTMANN, S.; GERSTENBERG, T.; SCHMIDT, C.; GEBAUER, H.; VAN DE RIET, K.; BERGER U.; ROLOFF, A. Citree: A database supporting tree selection for urban areas in temperate climate. **Landscape and Urban Planning**, v.157, p.14-25, 2017.



VOGT, J; HAUER, R. J.; FISCHER, B. C. The costs of maintaining and not maintaining the urban forest: a review of the urban forestry and arboriculture literature. **Arboriculture & Urban Forestry**, v.41, n.6, p.293-323, 2015.

YIN, S.; SHEN, Z.; ZHOU, P.; ZOU, X.; CHE, S.; WANG, W. Quantifying air pollution attenuation within urban parks: an experimental approach in Shanghai, China. **Environmental Pollution**, v.159, n.8-9, p.2155-2163, 2011.