

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE, UNICENTRO-PR

**ESTIMATIVAS DE VARIÁVEIS PARA
PLANEJAMENTO DA COMPOSIÇÃO DE PLANTIOS
NA FLORESTA URBANA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

JÉSSICA BATISTA DA MATA

IRATI

2019

JÉSSICA BATISTA DA MATA

**ESTIMATIVAS DE VARIÁVEIS PARA PLANEJAMENTO DA COMPOSIÇÃO DE
PLANTIOS NA FLORESTA URBANA**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Centro-Oeste, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, para obtenção do título de Mestre.

Prof^o. Dr. Rogério Bobrowski

Orientador

Prof^a. Dra. Fabiane Aparecida de Souza Retslaff

Coorientadora

IRATI

2019

Catálogo na Fonte
Biblioteca da UNICENTRO

M425e MATA, Jéssica Batista da.
Estimativas de variáveis para planejamento da composição de plantios na floresta urbana /
Jéssica Batista da Mata. – Irati, PR : [s.n.], 2019.
85f.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Bobrowski
Coorientadora: Profa. Dra. Fabiane Aparecida de Souza Retslaff
Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais. Área de
concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais. Universidade Estadual do
Centro-Oeste, PR.

1. Silvicultura. 2. Engenharia Florestal. 3. Modelagem de Crescimento. 4. Árvores urbanas.
I. Bobrowski, Rogério. II. Retslaff, Fabiane Aparecida de Souza. III. UNICENTRO. IV. Título.

CDD 715.2

TERMO DE APROVAÇÃO

Defesa Nº 126

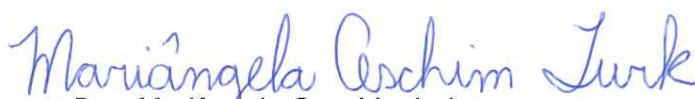
Jéssica Batista da Mata

“Estimativas de variáveis para planejamento da composição de plantios na floresta urbana”

Dissertação aprovada em 27/02/2019 como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável de Recursos Florestais, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:



Dra. Flávia Gizele König Brun
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Primeira Examinadora



Dra. Mariângela Ceschim Iurk
Secretaria de Estado da Educação
Segunda Examinadora



Dr. Rogério Bobrowski
Universidade Estadual do Centro-Oeste
Orientador e Presidente da Banca Examinadora

Irati - PR
2019

*Aos meus pais José e Aparecida, pelo
amor incondicional e todo incentivo,*

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus pelo dom da vida, por sempre guiar meus passos e ter me concedido forças para seguir a jornada.

Agradeço imensamente a minha família por todo apoio e incentivo, por serem minha maior grandeza e fonte de inspiração. Aos meus pais, José e Aparecida e aos meus irmãos, Chris e Theus agradeço infinitamente por todos sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço ao orientador Rogério Bobrowski, por ter aceito a orientação, por todo o conhecimento transmitido, ensinamentos e apoio durante esse período.

À Coorientadora Fabiane Retslaff, pelas correções, por compartilhar seu conhecimento e junto ao Prof. Afonso Figueiredo terem sido um braço direito em todas as análises da área de modelagem.

Aos amigos e colegas Thainah, Cleisi, Jhonathan, Renato, Jéssica, Kaline e Márcio que auxiliaram nas coletas de dados. Em especial ao Jorge, por todo apoio e incentivo, além da essencial ajuda nos dados de análise de tronco. Vocês foram essenciais para que esse estudo fosse concluído.

Agradeço ao auxílio da pesquisadora Dr. Patrícia Póvoa de Mattos que me abriu as portas da Embrapa Florestas e por todos os ensinamentos na identificação e leitura dos anéis de crescimento.

À Dani, a qual percorreu essa jornada junto comigo, agradeço pelas conversas, incentivos, pela amizade.

Aos meus amigos e professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, pela amizade, conversas e ensinamentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Enfim, a todos que colaboraram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

*“porque qualquer homem, mesmo perfeito, entre os homens,
não será nada, se lhe faltar a sabedoria que vem de voz.”*

Sb. 9,6.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
2. OBJETIVOS.....	14
2.1. Objetivo Geral	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. Avaliação e planejamento da floresta urbana	15
3.2. Variáveis que expressam o espaço ocupado pelas árvores urbanas	16
3.3. Variáveis que expressam o crescimento das árvores	18
3.4. Modelagem do crescimento de árvores urbanas	20
3.5. Estudos morfométricos em árvores urbanas	22
4. Material e métodos.....	24
4.1. Descrição da área de estudo	24
4.2. Seleção das espécies.....	25
4.2.1. <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (Vell.) Mattos	26
4.2.2. <i>Platanus x acerifolia</i> (Aiton) Willd.....	26
4.3. Procedimento metodológico	27
4.3.1. Determinação da área de copa em plano horizontal	27
4.3.2. Determinação da área de copa em plano vertical	30
4.3.3. Volume de copa.....	33
4.3.4. Caracterização Morfométrica	36
4.3.5. Modelagem da projeção de copa de árvores urbanas	38
4.3.6. Modelagem da altura total.....	40
4.3.7. Modelagem do crescimento diamétrico de árvores urbanas.....	41
4.3.8. Análise e Seleção dos Modelos	45
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1. Determinação da área de copa em plano horizontal.....	47
5.2. Determinação da área de copa em plano vertical.....	50
5.3. Volume de copa.....	54
5.4. Caracterização Morfométrica	56
5.5. Modelagem da projeção de copa de árvores urbanas.....	60
5.6. Modelagem da Altura total.....	69
5.7. Modelagem do crescimento de árvores urbanas	72
6. CONCLUSÕES	75
7. REFERÊNCIAS.....	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.	24
Figura 2: Procedimento para mensuração dos raios (r) de projeção de copa em relação aos pontos cardeais com indicação da altura total da árvore (h), altura de copa (h_{cp}) e altura de bifurcação (h_{bif}).	28
Figura 3: Procedimento de obtenção das fotografias das copas das árvores, sendo as duas fotos tomadas em ângulo de 90° , à uma distância (d) entre o tronco da árvore e o fotografo, numa posição distinta conforme adequação do espaço na rua e no parque.	31
Figura 4: Detalhes dimensionais (1,50 x 0,5 m) e localização da inserção da escala no tronco da árvore.	31
Figura 5: Procedimento adotado para a obtenção das fotografias para determinação da densidade da copa, onde o indivíduo está com câmera a uma distância de 0,4 m do tronco da árvore, à 1,3 m do solo (DAP).	35
Figura 6: Representação das variáveis coletadas para cálculo dos índices morfométricos em árvores adultas de <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> , em que: PC = proporção de copa; GE = grau de esbeltez; IA = índice de abrangência; IS = índice de saliência; FC = Formal de Copa; h_{cp} = altura de copa; h = altura total da árvore (m); DAP = diâmetro a altura do peito (cm), 1,30 m do solo; D_{cp} = diâmetro de copa (m).	36
Figura 7: Conformação das copas a partir das classes de formal de copa.	38
Figura 8: Coleta de rolos de incremento com trado de Pressler (A), obstrução dos orifícios com cera de abelha (B), alocação das amostras nos “porta-rolos” (C), lixamento dos rolos de incremento/amostras de <i>Handronathus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i>	42
Figura 9: Detalhes da marcação dos anéis de crescimento em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B).	43
Figura 10: Testes de médias para a área de projeção de copa horizontal estimada a partir do raio na direção Norte, Leste, Oeste e Sul (A) e para a média entre os raios Norte/Leste, Sul/Oeste, Norte/Sul, Leste/Oeste, Norte/Oeste e Norte/Leste (B) em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 1,0% de probabilidade de erro.	49
Figura 11: Esquema representativo do crescimento da copa conforme a posição cardinal dos raios, em que N-L representam os lados que cresceram mais e S-O o menor crescimento de copa.	50
Figura 12: Valores médios das estimativas de área de projeção de copa vertical (m^2) entre a figura real e as figuras geométricas (Triângulo, Parábola, Circulo, Elipse e Retângulo) em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5,0% de probabilidade de erro.	51
Figura 13: Ajuste da figura do triângulo com melhor conformação da área de projeção de copa vertical das árvores de <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR.	53
Figura 14: Diferenças estatísticas nas estimativas de volume de copa (m^3), por meio das figuras geométricas espaciais: Cone, Elipsoide, Esfera, Paralelepípedo e Paráboloide em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR. Médias	

seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5,0% de probabilidade de erro.	55
Figura 15: Conformação de copa preponderante para a maioria dos indivíduos de de <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR.	59
Figura 18: Relações alométricas entre diâmetro de copa (D_{cp}) e DAP em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B) presentes na área urbana de Irati-PR.	60
Figura 19: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados em <i>Handroanthus heptaphyllus</i>	64
Figura 20: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados em <i>Platanus x acerifolia</i>	65
Figura 21: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados por meio das variáveis selecionadas com stepwise em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B).	67
Figura 22: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados da relação hipsométrica em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i>	71
Figura 23: Distribuição dos resíduos ao longo das idades para o ajuste do modelo de crescimento de Chapman-Richards em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> (A) e <i>Platanus x acerifolia</i> (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR.	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos genéricos testados para estimar o diâmetro ou área (Y) de copa de árvores das espécies <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> .	39
Tabela 2: Modelos testados para estimar a altura total (h) em árvores de <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> .	40
Tabela 3: Tabela da Análise de Variância para a comparação da área de copa horizontal calculada com 8, 4 e 2 raios de projeção de copa em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	47
Tabela 4: Análise de Variância para a comparação da área de copa horizontal calculada com raio Norte, Leste, Oeste e Sul e para os raios Norte/Leste, Sul/Oeste, Norte/Sul, Leste/Oeste em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	48
Tabela 5: Análise de variância para os métodos de estimativa da área de copa em projeção vertical para duas espécies florestais presentes na floresta urbana de Irati-PR.	51
Tabela 6: Análise de variância para os métodos de estimativa do volume de copa para duas espécies florestais presentes na floresta urbana de Irati-PR.	54
Tabela 7: Estatísticas descritivas para índices morfométricos e variáveis mensuradas em árvores de <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> plantadas na área urbana de Irati-PR.	56
Tabela 8: Teste t para comparações entre altura total (m) mensurada e estimada, diâmetro de copa (m) mensurado e estimado e comprimento (ou altura) de copa (m) mensurada e estimada para <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> plantadas na floresta urbana de Irati-PR.	58
Tabela 9: Parâmetros estimados para os modelos ajustados, com respectivos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro padrão de estimativa (S_{yx} %), para estimar o diâmetro de copa em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	62
Tabela 10: Equações resultantes da estimativa de diâmetro de copa (D_{cp}) por meio da regressão stepwise e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro padrão da estimativa (S_{yx} %) em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	66
Tabela 11: Parâmetros estimados para os modelos ajustados, com respectivos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro padrão de estimativa (S_{yx} %), para estimar área de copa em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	67
Tabela 12: Equações resultantes da estimativa de diâmetro de copa (D_{cp}) por meio da regressão stepwise e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro médio (S_{yx} %) em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	68
Tabela 13: Equações resultantes da estimativa de altura total (h) em função do DAP e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro médio (S_{yx} %) em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	70
Tabela 14: Equações resultantes da estimativa de Diâmetro do tronco a Altura do Peito com casca (DAP_{cc}) em função do Diâmetro do tronco a Altura do Peito sem casca (DAP_{sc}) e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro médio (S_{yx} %) em <i>Handroanthus heptaphyllus</i> e <i>Platanus x acerifolia</i> presentes na floresta urbana de Irati-PR.	72

Tabela 15: Resultados do ajuste do modelo de Chapman-Richards para estimar diâmetro (DAP_{cc}) ao longo das diferentes idades para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR..... 73

RESUMO

Estudos sobre a forma como a floresta urbana cresce são importantes para gerar informações aos órgãos responsáveis por geri-la, para auxiliar na manutenção de forma eficaz, promovendo a oferta de benefícios e, frequentemente, a redução dos custos. Para isso, este estudo teve como objetivo analisar os padrões de crescimento de *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos e *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. presentes na floresta urbana de Irati – PR. Nesse sentido, foram verificadas as relações alométricas, área e volume de copa e geradas estimativas de crescimento ao longo dos anos. A área de projeção de copa no sentido horizontal foi estimada por meio da medição de oito raios de copa, comparando-se com a área determinada por meio da medição de quatro e dois raios, a fim de indicar a maneira mais prática e eficaz para isso. A área de projeção de copa vertical determinada por meio da vetorização de imagens das copas das árvores foi comparada com as estimativas feitas por fórmulas de área de figuras geométricas planas (retângulo, elipse, círculo, triângulo e parábola), a fim de indicar qual método seria de fácil determinação da área a partir de dados do inventário. O volume de copa hipotético foi estimado pelas figuras geométricas espaciais (paralelepípedo, elipsoide, esfera, cone e parabolóide) para verificação da ocupação tridimensional da copa das árvores. Ajustou-se diferentes modelos para estimar as dimensões da copa em função do diâmetro à altura do peito (DAP em cm) e/ou altura total (m). Para estudo do crescimento das árvores foi utilizada a análise de tronco parcial e os dados obtidos foram utilizados para ajustar o modelo biológico de Chapman-Richards com objetivo de compreender o crescimento em diâmetro de tronco e da copa ao longo dos anos. Constatou-se que a coleta de dois raios de copa pode ser eficiente para estimar a área de projeção vertical, desde que selecionados corretamente, sendo um na face N-L e outro na face S-O. A figura que melhor representou a copa das duas espécies foi a do triângulo, portanto, o cone foi considerado a figura de equivalência para cálculo do volume de copa. O diâmetro de copa pode ser estimado por meio do DAP, ainda que a variável altura possa melhorar o ajuste. O modelo de Chapman-Richards foi eficiente para estimar o DAP ao longo dos anos de ambas as espécies plantadas em área urbana, principalmente em idades mais avançadas. Essas informações permitem auxiliar o processo de gestão da composição da floresta urbana, porque podem gerar tendências de crescimento e grau de ocupação ao longo dos anos em áreas urbanizadas.

Palavras-Chave: árvores urbanas; copa de árvores; modelagem do crescimento; silvicultura urbana.

ABSTRACT

Studies on how urban forest grows are important to generate information for the agencies responsible for its management, to assist its effective maintenance, to promote the provision of benefits, and the reduction of costs. This research had as objective to analyze the growth patterns of *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos and *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. present in the urban forest of Irati, Parana state. In this sense, we verified the allometric relationships, crown area and volume, and growth estimates over the years. We evaluated the crown area projection in the horizontal direction employing eight crown rays to estimate it and compared it with the crown area determined through four and two rays, to indicate the most practical and efficient way for this. By the vectorization of tree crown images, we estimated the area of vertical crown projection and compared it with the estimates made by equations of geometric figures (rectangle, ellipse, circle, triangle, and parabola), to indicate which method would be easily determined from inventory data. To verify the three-dimensional shape of trees' crowns, we determined the hypothetical crown volume by geometric figures (parallelepiped, ellipsoid, sphere, cone, and paraboloid). We used different models to estimate the dimensions of the crown as a function of diameter at breast height (DBH in cm) and/or total height (m). We used partial trunk analysis to study the growth of the trees, and the data were used in the biological model of Chapman-Richards to understand the trunk and crown diameter growth over the years. We observed that two canopy rays are efficient to estimate the vertical projection of the crown area since they are correctly selected one on the north - east face and one on the south - west face. The triangle figure was the one that best represented the crown of the two species, so the cone was the best figure to calculate the crown volume. The canopy diameter can be estimated using the DBH, although the height variable can improve the model fit. The Chapman-Richards model was efficient to estimate the DBH over the years for both species planted in urban areas, especially at more advanced ages. This information allows us to help the management process of urban forest composition because it can generate growth trends and the degree of local occupation over the years in urbanized areas.

Keywords: urban tree; tree crown; growth modeling; urban forestry.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, o surgimento das áreas urbanas, deu-se de maneira desordenada e acelerada e a preocupação com áreas verdes foi deixada de lado. Ainda hoje as cidades continuam crescendo em termos de infraestruturas construídas e densidade demográfica, suprimindo cada vez mais as poucas áreas verdes existentes.

Um dos recursos para reverter tal questão é o planejamento urbano, o qual permitirá um crescimento inteligente visando o desenvolvimento urbano sustentável. Segundo Ahern, (2012), Anguluri e Narayanan (2017) o planejamento atrelado ao aumento da infraestrutura verde é uma parte crucial do desenvolvimento das cidades, pois fornece ferramentas para entender, modelar e gerenciar a dinâmica e frequência dos ecossistemas urbanos.

O reconhecimento da necessidade de plantar árvores nas calçadas, praças e parques, devido aos benefícios ofertados como, qualificação ambiental, da saúde e do bem-estar social têm se destacado nos últimos anos. Entretanto, há um grande revés a ser resolvido: espaço disponível nos ambientes urbanos para a introdução de árvores e áreas verdes que permitam o crescimento das árvores de forma a promover os benefícios que se almeja que ofertem.

Uma das maneiras de gerenciar a necessidade de áreas verdes com a falta de espaços nas áreas urbanas é compreendendo a forma com que as árvores crescem nesses ambientes. Cada espécie tem um crescimento diferente em relação ao ambiente em que está inserida, principalmente em áreas urbanas onde as condições edafoclimáticas são de alta variação e o crescimento é livre de competição com outras árvores, em muitas situações.

Em função disso, é premente a realização de estudos *in situ* em diferentes cidades e contemplando diferentes espécies, isoladas ou em grupo. Essas informações servirão como meio de apoio para o planejamento da composição e manutenção, a partir do conhecimento das áreas disponíveis para plantio e do tamanho máximo que a espécie plantada poderá atingir. Isso pode auxiliar a determinar o momento em que as árvores irão necessitar de intervenções como manejo, podas ou até mesmo a retirada de um indivíduo.

Por isso, esse trabalho visa responder questões referentes ao crescimento de *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos e *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd., espécies amplamente utilizadas na arborização urbana, com enfoque em grau de ocupação de espaço, dando suporte para um bom planejamento e diretrizes da arborização urbana.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar os padrões de crescimento de *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos e *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd. presentes na floresta urbana de Irati – PR.

2.2. Objetivos específicos

- a) Determinar a área e o volume de copa em diferentes planos referentes à ocupação do espaço pelas árvores;
- b) Analisar a variabilidade dimensional, as relações alométricas e as variáveis morfométricas das espécies;
- c) Determinar o melhor modelo que expressa a relação entre diâmetro de copa em função de variáveis dendrométricas;
- d) Verificar a aplicação e qualidade do ajuste do modelo de crescimento de Chapman-Richards para estimar o diâmetro à altura do peito (DAP) em qualquer idade e compreender a dinâmica da copa ao longo do tempo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Avaliação e planejamento da floresta urbana

Autores como Dieleman e Wegener, (2004), Pedersen et al. (2004) e Carsjens e Ligtenberg (2007) comentam que, historicamente, na Europa as cidades se desenvolveram durante o processo de urbanização perante o conceito “*compact city*” ou cidades compactas. Essa terminologia se refere ao aumento dos espaços urbanos visando o melhor uso da terra, tal qual as recentes políticas de crescimento inteligente dos Estados Unidos. Entretanto, as cidades compactas colocaram em segundo plano a preservação ambiental nas áreas urbanas, de forma que os problemas proeminentes desse crescimento, como poluição do ar, aumento da temperatura e ruídos, viessem à tona.

No Brasil, a situação não foi muito diferente, segundo Biondi (2015) as cidades advindas do Brasil Colônia não possuem estrutura para arborização de ruas e são poucos os espaços com áreas verdes em meio a urbanização. Por outro lado, têm-se aumentado a preocupação com a qualidade de vida nas áreas urbanas de forma com que a arborização de ruas e os espaços verdes tem sido colocado em questão.

Dessa forma, a fim de alcançar um ambiente urbano sustentável, no qual se têm um equilíbrio entre urbanização, atividades humanas e meio ambiente, é necessário que se faça um planejamento antecipadamente, ao invés de ser avaliado posteriormente, como é comumente realizado nas regiões em que o desenvolvimento urbano foi pensado somente no uso eficiente da terra. Para isso, é necessário que as entidades governamentais responsáveis pelo planejamento urbano tenham em mãos informações da distribuição espacial dos diferentes elementos da malha urbana e de prováveis problemas de ordem ambiental que possam ocorrer, a fim de buscar promover um ambiente de interação sustentável (CARSJENS; LIGTENBERG, 2007).

O entendimento da estrutura da floresta urbana é importante para que a avaliação seja realizada de forma adequada e gere informações refinadas para o planejamento. Dentro disso, Biondi (2015) classifica a floresta urbana em diferentes tipologias, sendo essas, caracterizadas por áreas particulares ou áreas públicas (arborização de calçadas e áreas verdes). As árvores presentes nas calçadas, praças, parques, constituem a menor porção no cenário da floresta urbana quando comparado a toda a área verde existente nas cidades.

Todavia, tem-se evidenciado o aspecto individual das árvores (arborização), tanto em áreas públicas, quanto em áreas privadas devido aos benefícios ambientais, econômicos e sociais proporcionados à comunidade. Esses benefícios dependem de atributos estruturais, bem como de atividades de gerenciamento que influenciam no crescimento de árvores urbanas, e é por meio da arboricultura que se maneja a floresta urbana no âmbito de uma única árvore como um ecossistema capaz de proporcionar tais benefícios (MCPHERSON, 2003; KONIJNENDIJK et al., 2006).

Para concretizar o fornecimento destes benefícios, a floresta urbana precisa passar por ações de planejamento que são definidas com base em um processo preliminar de avaliação quali-quantitativo (BIONDI; ALTHAUS, 2005). A avaliação qualitativa envolve diferentes procedimentos para reconhecer a condição geral das árvores e a avaliação quantitativa envolve a obtenção de variáveis mensuráveis, como diâmetro do tronco, altura total, diâmetro de copa, largura da calçada, área dos canteiros, dentre outras (PEPER et al., 2001a, 2001b; GUTSELL; JOHNSON, 2002; LARSEN; KRISTOFFERSEN, 2002; BIONDI; ALTHAUS, 2005; LUKASZKIEWICZ; KOSMALA, 2008).

3.2. Variáveis que expressam o espaço ocupado pelas árvores urbanas

A floresta urbana é um meio complexo, proveniente da interação do meio vegetal com pessoas, ambientes construídos e seu desenvolvimento, por esse motivo não é aconselhável realizar avaliações da floresta urbana sem levar em consideração o espaço ocupado por ela (NOWAK et al., 2001). A avaliação da floresta urbana pode ser realizada em diferentes níveis, nacional, regional ou local e ainda, considerando a floresta como um todo, a interação entre áreas verdes e infraestruturas, ou no âmbito de árvores individuais (QUIGLEY et al., 2002; GRIMMOND et al., 2011; LAWRENCE et al., 2012; MCPHERSON; PEPER, 2012; TROXEL et al., 2013).

Quando se estuda árvores individuais o conhecimento como, o tamanho máximo que um indivíduo arbóreo pode atingir, em altura e projeção de copa, constitui informações importantes para os gestores das florestas urbanas e paisagistas. Isso permite selecionar as espécies que são mais adequadas para os espaços existentes em determinadas áreas, pois assim será possível diminuir os impactos às infraestruturas pré-existentes, bem como reduzir conflitos futuros que podem resultar em prejuízos (MCPHERSON et al., 2016). Dessa forma, o

conhecimento prévio do porte e do tamanho da copa da árvore a ser plantada, segundo Barbedo (2005) e Ribeiro (2009) serve para determinar as condições físicas e espaciais adequadas para o máximo de desenvolvimento da planta, com dimensões apropriadas, evitando conflitos com infraestruturas, como edifícios, rede elétrica viária, trânsito e até mesmo com os próprios pedestres.

As previsões de projeção de área de copa, tanto no sentido do crescimento horizontal das árvores, como no crescimento vertical ao longo dos anos, permitem que os planejadores promovam a cobertura de copa ideal para cada local. Assim, fornecem informações do espaço que as árvores ocupam e ainda, permitem melhorar a distribuição dos benefícios ofertados ao longo de toda a área urbana (MCPHERSON, 2001; SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008). Dahlhausen et al. (2016) explicam que, além da ocupação do solo, informações de copa servem também para avaliar os serviços ecossistêmicos como condições de sombra e regulação do microclima.

Segundo Sanquetta et al. (2011), a forma de mensurar a área de copa e estimar a estrutura tridimensional das árvores é por meio do raio médio de copa e do diâmetro a altura do peito, sendo que essas são as variáveis mais simples e fáceis de serem mensuradas a campo. Diversos autores afirmaram que a determinação da área de copa obtida por meio do raio médio mais utilizada nos inventários da arborização urbana é tomando quatro raios de projeção, método adotado em diferentes trabalhos (MILANO, 1984; FRELICH, 1992; PEPER; MCPHERSON, 1998; ROCHA et al., 2004; ALMEIDA; RONDON NETO, 2010; BOBROWSKI 2011, 2014).

Com relação a isso, Costa et al. (2013) testaram diferentes procedimentos para determinação da área de copa em *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze presentes em floresta nativa na região sul do Brasil, por meio da mensuração de dois raios perpendiculares, quatro e oito raios, e constataram não haver diferença significativa entre os métodos. Por outro lado, Röhle (1986) e Pretzsch et al. (2015) afirmaram que o método contemplando oito raios de copa é uma mensuração internacionalmente utilizada devido a sua precisão, pois em áreas urbanas as margens das copas de árvores são irregulares e um maior número de raios mensurados geram melhores estimativas de área.

O conhecimento do volume também é uma informação relevante para o planejamento da arborização, tanto no ponto de vista estético como na questão do espaço físico de ocupação (SILVA et al., 2007). Apesar de alguns planos diretores de arborização e manuais de

arborização sugerirem determinados portes de árvores para plantio na arborização de ruas, conforme padrão de calçada (CEMIG, 2011), ainda faltam trabalhos que demonstrem procedimentos para a determinação da projeção tridimensional das árvores a fim de evidenciar o real comportamento das espécies, de forma a compreender as características específicas do crescimento e da dinâmica das espécies individuais (SUZUKI, 2002).

Dessa forma, Ludwig et al. (1975) e Durlo e Denardi (1998) afirmaram que o volume de copa pode ser calculado por meio de equações representativas das figuras de sólidos geométricos (por exemplo, esferas, cones, etc.) utilizando o diâmetro e a altura de copa que são as variáveis básicas para estimar o volume de massa verde da árvore (HEMERY et al., 2005). Além disso, de acordo com Durlo et al. (2004), também é possível reconstruir a projeção tridimensional das árvores por meio de duas fotografias tomadas em ângulos de 90°, que proporcionará a estimativa de volume por meio da construção de modelos matemáticos.

O volume e o diâmetro da copa das árvores estão diretamente ligados a qualidade do planejamento da arborização urbana. Entretanto, não se acredita que volumes e diâmetros de copa estejam sistematicamente correlacionados, por exemplo, uma árvore pequena plantada na calçada pode ter o mesmo diâmetro de copa médio de uma árvore velha podada, porém os volumes de copa desses dois indivíduos são significativamente diferentes (JUTRAS, 2008), o que torna necessário o estudo criterioso da copa. Além do mais, o volume de copa também deve ser considerado em densidade, pois segundo Silva et al. (2007), a densidade de copa é um dado relevante no levantamento da arborização urbana, pois por meio da caracterização da densidade pode-se obter informações sobre alguns benefícios ofertados, como conforto térmico e intensidade de sombreamento.

3.3. Variáveis que expressam o crescimento das árvores

O crescimento de árvores urbanas e suas exigências de espaço são de grande importância para o planejamento da arborização pois, conhecer as futuras necessidades de espaço conforme o crescimento de cada espécie arbórea em determinada idade permitirá um planejamento futuro adequado para as áreas verdes urbanas. Além do mais, as informações alométricas das árvores urbanas são essenciais para garantir a segurança pública (QUIGLEY, 2002; DAHLHAUSEN et al., 2016).

De acordo com Grabosky e Gilman (2004), devido as crescentes preocupações com a sustentabilidade e planejamento de ambientes urbanos, as informações acuradas sobre a dinâmica de crescimento das árvores tornam-se de suma importância. Por meio de bons planos de manejo florestal da arborização urbana e implementação de planos municipais de qualidade é possível gerar melhores planejamentos de espaços e conhecimento sobre as diferentes ordenações em que as árvores de ruas estão propícias.

O crescimento das árvores está expresso nas características de tamanho, incluindo a altura, o diâmetro do tronco, diâmetro e altura da copa e o comprimento dos ramos, estruturas que possuem reservas disponíveis para o seu desenvolvimento (FOLLETT, 2016). Entretanto, conforme Harris et al. (1999), diversos fatores podem influenciar nesse crescimento, como as características da espécie, fatores relacionados a genética da mesma, questões locais onde a árvore está inserida, bem como as variações ambientais ao longo do tempo.

Segundo Stepka (2012), a dendrocronologia (estudos dos anéis de crescimento no tronco das árvores) permitem o entendimento do padrão de crescimento ao longo do tempo. Por meio da visualização do crescimento anual em diâmetro é possível gerar índices de desenvolvimento da árvore e, assim, refazer a dinâmica de crescimento diamétrico da árvore de forma ágil, segura e precisa. Canetti et al. (2017) e Milani et al. (2018) comentam também que devido as grandes interferências em que as árvores urbanas estão submetidas, o estudo dos anéis de crescimento é uma forma de compreender o comportamento das árvores em resposta a essas constantes alterações. Além disso, Calfapietra et al. (2015) afirmaram que estudos dendrocronológicos nas árvores urbanas deveriam ser mais realizados, pois é um bom recurso para compreender o comportamento das plantas em futuras condições de mudanças climáticas.

De acordo com Suzuki (2000), todas as estruturas das árvores que estão acima do solo são determinadas pela disposição dos brotos fazendo com que o crescimento vegetativo possa não ser uniforme dentro da copa ou dentro de galhos individuais. Essas características de crescimento permitem conhecer a idade de determinado sistema, principalmente quando se trata de árvores com muitas brotações. Por exemplo, na parte inferior da copa, os galhos são mais velhos e são mais estruturados, com tecidos mais resistentes. Em contrapartida, a parte de cima da copa possui um sistema relativamente jovem e estruturas que ainda estão em desenvolvimento (SUZUKI, 2002; FOLLETT, 2016).

Dentro disso, a forma indicada para analisar o crescimento anual das plantas por meio dos galhos varia conforme as características das espécies. Em plantas decíduas, o

desenvolvimento pode ser verificado por meio das cicatrizes deixadas pelas gemas terminais enquanto que, as coníferas possuem uma circunferência em cada galho, indicando o crescimento durante um ano quando as espécies têm apenas um fluxo de desenvolvimento por ano.

Verifica-se o crescimento anual dos galhos em espécies decíduas por meio das folhas ou das gemas que estão presentes no ramo da estação atual (HARRIS et al., 1999). Assim, essas informações de padrão de crescimento são importantes para o manejo estrutural da copa de árvores urbanas, tornando necessário o estudo dos padrões de formação e manejo do sistema de galhos e a posição dos mesmos dentro das copas (SUZUKI, 2002).

Dessa forma, arboristas e gestores da floresta urbana podem prever de forma precisa os efeitos das árvores, custos prévios e futuros, cenários, práticas de manejo e gestão com a utilização de equações que expressam o crescimento das árvores por meio de medidas como diâmetro a altura do peito (DAP), altura total, diâmetro e altura de copa (LUKASZKIEWICZ; KOSMALA, 2008; PEPER et al., 2014). Esses dados dão suporte para utilização da modelagem, ferramenta muito utilizada atualmente, que permite compreender a dinâmica entre a disponibilidade de espaços e a implementação de áreas verdes (GRIMMOND et al., 2011). Entretanto, para que essas informações sejam condizentes com a realidade se faz necessário a coleta de dados reais a campo, para então modelar e realizar estimativas futuras.

3.4. Modelagem do crescimento de árvores urbanas

O estudo da modelagem na arboricultura pode fornecer informações importantes para as práticas de manejo (MCPHERSON; PEPER, 2012). Conforme McPherson et al. (2016), os modelos de crescimento de árvores urbanas são úteis para calcular os benefícios fornecidos ao meio ambiente e à qualidade de vida humana. Os dados de crescimento dão suporte a esses modelos e permitem o conhecimento entre os fatores de influência e o desenvolvimento das árvores ao longo dos anos, bem como características das condições específicas de local e prováveis práticas de manejo.

As informações sobre a dinâmica de crescimento de árvores e estudo de modelagem na floresta urbana são escassas, principalmente quando se compara com a área de silvicultura de florestas plantadas, pois sabe-se que o conhecimento é abundante sobre o comportamento das árvores nessas condições (MCPHERSON; PEPER, 2012). Entretanto, alguns estudos têm

mostrado que essas informações não podem ser utilizadas para árvores urbanas, pois as árvores em condições urbanas possuem uma dinâmica de crescimento caracterizada pelo ambiente em que foram plantadas (MCHALE et al., 2009; DAHLHAUSEN et al., 2016). Quando se leva em consideração estudos em longo prazo na área urbana, os desafios são ainda maiores, pois além da quantidade de espécies arbóreas que se tem para modelar, existem ambientes distintos e muita variedade de ações de manejo (REINEKING et al., 2004).

De acordo com Brack (2006), os modelos de crescimento utilizados fazem relação entre as dimensões de copa e a altura total das árvores, pois essas são variáveis altamente correlacionadas ao tempo e ao custo do manejo. Por exemplo, uma copa mais ampla e/ou uma árvore mais alta requer equipamentos de maior porte no momento das práticas de manutenção, agregando assim maior custo na operação de manejo. Por outro lado, as variáveis altura e tamanho da copa de árvores urbanas estão diretamente relacionadas com a oferta de benefícios, tornando-as ainda mais importantes.

Outros autores comentam sobre a utilização da modelagem em árvores individuais, condição na qual são encontradas boa parte das árvores da floresta urbana. Durlo et al. (2004) afirmaram que a partir de um diâmetro de tronco conhecido é possível estimar um diâmetro de copa para qualquer posição ao longo de seu comprimento, pois as copas de árvores variam de tamanho e de forma conforme seu próprio diâmetro a altura do peito (DAP).

Para Pretzsch et al. (2015), a relação do diâmetro de tronco da árvore com as dimensões da copa representa o tamanho da árvore e está relacionada à dinâmica de crescimento dos indivíduos presentes na floresta urbana. Isto deve ser levado em consideração, principalmente em áreas abertas e livre de concorrência, porque as árvores atingem o máximo tamanho de copa em um determinado diâmetro.

Peper et al. (2001a), utilizaram o diâmetro a altura do peito (DAP ou d) para prever outras medidas de difícil medição a campo (altura total, diâmetro e altura da copa) em sete espécies plantadas na arborização da cidade de Modesto, na Califórnia, EUA. Esses autores encontraram um bom coeficiente de determinação ajustado para o modelo de diâmetro de copa em função do diâmetro de tronco, com coeficiente de determinação $R^2_{aj} = 0,70$.

North (2013) também estimou o diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito e ainda, em função do afilamento da base do tronco de árvores urbanas em Minnesota, os coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}) foram entre 0,48 e 0,71, variando conforme a espécie. Dentre outras pesquisas nesse mesmo sentido, que envolvem modelagem de árvores

urbanas constam Larsen e Kristoffersen (2002), Stoffberg et al. (2010), Peper et al. (2014), Dahlhausen et al. (2016) e Follett (2016).

3.5. Estudos morfométricos em árvores urbanas

Os índices morfométricos servem para expressar as relações interdimensionais, o comportamento individual e as interações das árvores com o ambiente urbano, com o objetivo de gerar informações para um planejamento de implementação e de práticas de manejo da floresta urbana, por meio de variáveis mensuráveis como altura total (h) da árvore, diâmetro a altura do peito (DAP ou d), altura e diâmetro de copa (BOBROWSKI, 2015).

Os índices comumente utilizados para representar tais relações são: grau de esbeltez, proporção de copa, índice de saliência, índice de abrangência e formal de copa. Dentre alguns autores que estudaram as relações morfométricas das árvores, destacam-se Durlo e Denardi (1998), Nutto et al. (2001), Durlo et al. (2004), Tonini e Arco-verde (2005), Roman et al. (2009) e, especificamente na arborização urbana, os índices foram também estudados por Bobrowski et al. (2013) e por Bobrowski e Biondi (2017).

As relações morfométricas permitem gerar informações da árvore num contexto geral ao longo dos anos, proporcionando a tomada de decisões de práticas silviculturais independente do conhecimento da idade da árvore. Por exemplo, a altura de um fuste livre de nós, a proporção de copa que se espera e a determinação do espaço necessário ao longo do tempo, poderão ser previstos com os estudos dos índices de saliência, abrangência e das dimensões individuais da árvore (DURLO, 2001).

De acordo com Roman et al. (2009), Cavalli (2013) e Bobrowski (2015) os índices morfométricos teriam as seguintes aplicabilidades nos estudos da floresta urbana:

- Grau de esbeltez: relação altura, diâmetro a altura do peito visa priorizar as ações de avaliação de risco das árvores urbanas, diante da dificuldade de avaliar todas de forma detalhada;
- Proporção de Copa: relação entre o comprimento da copa e a altura total da árvore, quanto maior a porcentagem massa verde (copa), maior poderá ser a capacidade produtiva da árvore, sendo esse um indicador de vitalidade;
- Índice de Saliência: relação diâmetro de copa e o diâmetro a altura do peito (dc/d), que serve como indicador do espaço que uma árvore necessita ao atingir certo diâmetro;

- Índice de Abrangência: a relação entre o diâmetro de copa e a altura (h) da árvore, permite reconhecer o momento em que as copas das árvores poderão se entrelaçar;
- Formal de Copa: representa a razão entre o diâmetro de copa e o comprimento de copa, demonstrando a arquitetura da árvore livre de competição.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição da área de estudo

A pesquisa foi realizada no município de Irati, Paraná, localizado na região centro-sul do Estado, a 156 km da capital Curitiba e entre as coordenadas 25°27'56" de latitude Sul e 50°37'51" de longitude Oeste, no segundo Planalto Paranaense (VALÉRIO et al., 2008) (Figura 1).



Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.
Fonte: Adaptado do *Google Maps* (2018).

O clima regional é do tipo Cfb, de acordo com a classificação de Köppen-Geiger, com estações definidas, chuvas bem distribuídas durante todo o ano e alguns períodos de geadas intensas. A umidade relativa do ar é, em média, de 80,3%, a precipitação pluviométrica em torno de 1442 mm anuais e a temperatura média se mantém em torno de 17,2°C com mínima de -2°C e máxima de 32°C (MAYER, 2012). De acordo com IBGE (2010) o município possui 56.207 habitantes, sendo 80% da população residente na área urbana.

A cidade está inserida dentro do ecossistema da Floresta Ombrófila Mista, no Bioma Mata Atlântica (MAYER, 2012). Entretanto, a Floresta Urbana, em suas diferentes tipologias (BIONDI, 2015), está composta por espécies nativas e exóticas, tanto nas praças e parques, quanto na arborização de calçadas. Assim, Schallenberger et al. (2010) ao avaliarem parte da floresta urbana de Irati-PR, encontraram diferentes espécies, dentre *Syagrus romanzoffiana* Cham., *Ligustrum lucidum* W. T. Aiton., *Tipuana tipu* (Benth.) O Kuntz., *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd., *Lagerstroemia indica* L., *Salix babylonica* L., *Cryptomeria japonica* Thunberg., *Araucaria angustifolia* (Bert.) Kuntze., *Cupressus lusitanica* Miller., *Grevillea robusta* A. Cunn. Ex R. Br., *Juniperus chinensis* L., *Chamaecyparis pisifera* Siebold & Zucc., *Cupressus macrocarpa* Hartw. Ex Gordon., *Handroanthus albus* (Cham.) Mattos., *Senna multijuga* Rich. I. & B., *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos.

4.2. Seleção das espécies

As espécies selecionadas para esta pesquisa compõem o tratamento paisagístico de duas tipologias diferentes da Floresta Urbana de Irati (Arborização de Calçadas e o Parque Urbano), que foram selecionadas em virtude de haver um número mínimo de 30 indivíduos arbóreos numa mesma rua ou local, a fim de reduzir a variabilidade dos fatores de influência sobre o crescimento das árvores. A seleção também atendeu ao critério de excluir árvores podadas ou com outras interferências de manejo, sendo livre de concorrência e conflito com infraestruturas, com objetivo de obter valores reais e confiáveis quanto ao máximo desenvolvimento específico da copa de cada espécie, como sugerido por Pretzsch et al. (2015).

Os indivíduos da espécie *Handroanthus heptaphyllus* (ipê-roxo) estão plantados na calçada da Rua da Liberdade, no centro da cidade de Irati, acompanhando a linha férrea, em canteiros permeáveis recobertos por grama São Carlos. Enquanto que, os indivíduos de *Platanus x acerifolia* (plátanos) fazem parte do tratamento paisagístico do Parque Aquático e estão plantados em área permeável recoberta por grama São Carlos (Figura 1).

4.2.1. *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos

Ipê-roxo-de-sete-folhas ou ipê-rosa-de-sete-folhas, pertencente à família Bignoniaceae, é uma espécie nativa com ocorrência desde o sul da Bahia até o Rio Grande do Sul, nas Florestas Estacionais e Floresta Ombrófila Densa (SAUERESSIG, 2014).

A árvore pode atingir até 30 metros de altura com copa ampla e estruturalmente globosa, tendo um diâmetro de tronco de até 150 centímetros, com fissuras longitudinais deiscentes em placas, pardo-acinzentada, cilíndrico e levemente tortuoso. As folhas são caracterizadas morfológicamente como compostas, opostas, digitadas, pecioladas, possuindo de 5 a 7 folíolos (SAUERESSIG, 2014). De acordo com Lorenzi (2000), quanto a medidas dendrométricas, a altura da árvore não passa de 20 metros, com diâmetro a altura do peito (DAP) variando entre 40 e 80 centímetros.

Essa espécie é muito utilizada no paisagismo, em geral, por possuir uma floração deslumbrante, tornando-a assim, popular na arborização de calçadas (LORENZI, 2000). Ipê roxo é a árvore mais plantada em ornamentações de praças, canteiros e calçadas, devido a sua floração majestosa e espetacular (BACKES e IRGANG, 2004).

4.2.2. *Platanus x acerifolia* (Aiton) Willd.

Historicamente a espécie é datada como um híbrido entre o *Platanus orientalis* L., de origem europeia e asiática, com o *Platanus occidentalis* L., de origem americana. A árvore pode atingir de 20 a 30 metros de altura e possui o tronco cilíndrico, espesso, claro e vistoso e copa globosa ou ovalada. As folhas são grandes, palmadas com cinco lobos e margens dentadas, passam por mudanças na coloração do verde para o amarelo bronzeado entre as estações de outono e inverno. A floração ocorre nos meses de março e abril e não é vistosa (LORENZI et

al., 2003). O volume de copa médio de 303,89 m³ em árvores plantadas na floresta urbana na faixa de 10 e 12 anos (FERNÁNDEZ-SARRÍA et al., 2013).

O gênero *Platanus* tornou-se muito popular no paisagismo urbano em toda a Europa, América do Norte e em outras regiões de clima temperado, por possuir características morfológicas e fisiológicas peculiares. O híbrido possui rápido crescimento, boa capacidade de sombreamento devido à copa frondosa, tolerante à poda e adaptação a ambientes com poluição, comuns em áreas urbanas (LIU et al., 2007). Plátanos, como popularmente chamado no Brasil, também é muito utilizada na arborização de calçadas de regiões de clima temperado por possuir o tronco e a folhagem dotados de muita capacidade ornamental (LORENZI et al., 2003).

4.3. Procedimento metodológico

As avaliações foram realizadas em dois momentos, primeiro fez-se a coleta de dados de área de projeção de copa, volume e densidade de copa durante os meses de janeiro e fevereiro, em pleno verão de 2018, considerando as copas das árvores em máximo vigor. As coletas relacionadas ao crescimento foram realizadas durante o outono de 2018, entre os meses de março a junho, porque, segundo Zanon e Finger (2010), este é o período recomendado para as coletas, devido à menor pluviosidade e temperatura, o que restringe os processos fisiológicos e, conseqüentemente, o crescimento vegetativo das árvores.

4.3.1. Determinação da área de copa em plano horizontal

A projeção horizontal das copas das árvores 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), tomando como ponto de partida o centro do tronco da árvore até o perímetro da projeção máxima da copa, conforme procedimento sugerido por Röhle (1986). As oito medidas foram realizadas com uma trena a laser (Leica Disto A5, Leica) (Figura 2). Oito raios de copa foram mensurados para obter estimativas mais refinadas do desenho de projeção, ou seja, uma representação mais próxima da projeção real.

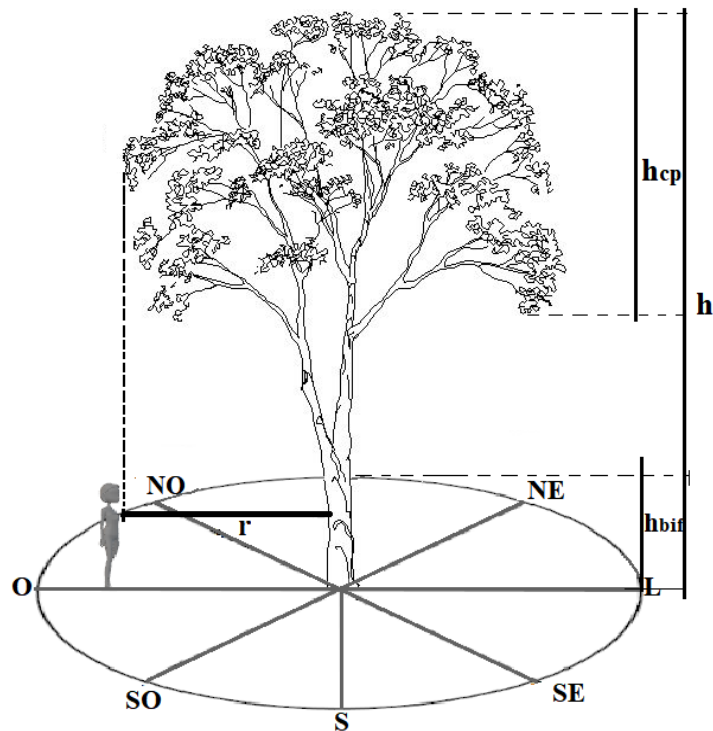


Figura 2: Procedimento para mensuração dos raios (r) de projeção de copa em relação aos pontos cardeais e colaterais com indicação da altura total da árvore (h), altura de copa (h_{cp}) e altura de bifurcação (h_{bif}).

Este procedimento de mensuração das projeções dos raios foi adotado para comparar estimativas entre três procedimentos de determinação da área de copa: o método prático e rápido (COSTA et al., 2013), tomando dois raios; o método amplamente utilizado no Brasil (MILANO, 1984; FRELICH, 1992; PEPER; MCPHERSON, 1998; BOBROWSKI, 2011; 2014) com quatro raios (N, S, L e O); e o método considerado mais acurado e definido como padrão internacional (RÖHLE, 1986; PREUHSLE, 1981; LOCKHART et al., 2005; PRETZSCH et al., 2015; DAHLHAUSEN et al., 2016) com oito raios de copa (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO).

O objetivo desta comparação entre métodos foi averiguar se existe diferença significativa entre os procedimentos para conciliar praticidade a campo e exatidão na estimativa de área de copa.

Os raios médios de copa (\bar{r}) foram determinados por meio da média quadrática dos raios medidos, pois de acordo com Pretzsch et al. (2015) essa é uma forma de diminuir o erro no cálculo que transfere o raio de copa para área de projeção de copa (Equação 1).

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

Em que: \bar{r} = raio médio da projeção da copa (m);

r = raio (m);

n = número de raios.

Utilizou-se o método um para comparar a área de projeção de copa horizontal (ACh_n) estimada de três maneiras, sendo: ACh₈ – corresponde à área calculada com a média de oito raios de copa (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO); ACh₄ – corresponde à área calculada com a média de quatro raios de copa medidos nos pontos cardeais (N, L, S e O); e ACh₂ – corresponde à área calculada com a média de dois raios de copa medidos em prolongamento de 180° (N-S) (Equação 2).

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

Em que: ACh = área de copa horizontal (m²);

\bar{r} = raio médio da projeção da copa (m);

n = número de raios.

Para definir quais os dois raios de copa deveriam ser selecionados para proporcionar a melhor estimativa em ACh₂, utilizou-se o método dois para comparar os raios cardeais individuais (N, S, L e O) e o método três para comparar os conjuntos dos mesmos (N-S, L-O, N-L, S-O, N-O e S-L).

Para cada uma das espécies, os dados das estimativas de área de copa, por meio dos três métodos, foram analisados considerando um Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), sendo que cada uma das 30 árvores foi considerada como bloco e os tratamentos corresponderam aos três métodos de estimativa de área de copa (ACh₈; ACh₄; ACh₂), no qual

o método de estimativa de área de projeção de copa com 8 raios foi considerado a testemunha.

Utilizou-se o DBC pois as árvores (blocos) desse estudo estão presentes em áreas abertas e, apesar de estarem sob mesmas condições de plantio, de solo e de microclima, árvores urbanas sofrem com grande influência do meio externo, podendo haver diferença entre elas. Segundo Ferreira (2000), esse delineamento considera os três princípios da experimentação: repetição, casualização e controle local. Esse último, por sua vez, é representado pelos blocos (árvores), de tal maneira que cada um dos blocos é influenciado por todos os tratamentos.

Após comprovada a homocedasticidade das variâncias pelo teste de Bartlett ao nível de 5,0 % de probabilidade de erro, os dados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) empregando-se o *software* R Studio Version 1.0.136 e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 1,0 % de probabilidade de erro.

4.3.2. Determinação da área de copa em plano vertical

Neste procedimento, a área de copa vertical foi determinada a partir da vetorização de imagens (área real) e a partir de estimativas por meio de figuras geométricas planas. Tal análise teve como finalidade compreender a estrutura vertical, sendo analisada a conformidade e espaço ocupado pelas copas neste plano, em cada uma das espécies.

A área real de projeção em plano vertical foi determinada por meio da vetorização de fotografias horizontais tomadas em duas posições diferentes da árvore, formando ângulo de 90° entre si (Figura 3), pois as árvores de *Handroanthus heptaphyllus* encontravam-se em calçadas sinuosas e as de *Platanus x acerifolia* na borda do lago do parque aquático, o que tornou inviável a obtenção de imagens em sentidos padronizados.

O procedimento de coleta de dados foi realizado com a tomada de fotografias 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 de copa fosse enquadrada no visor da câmera.

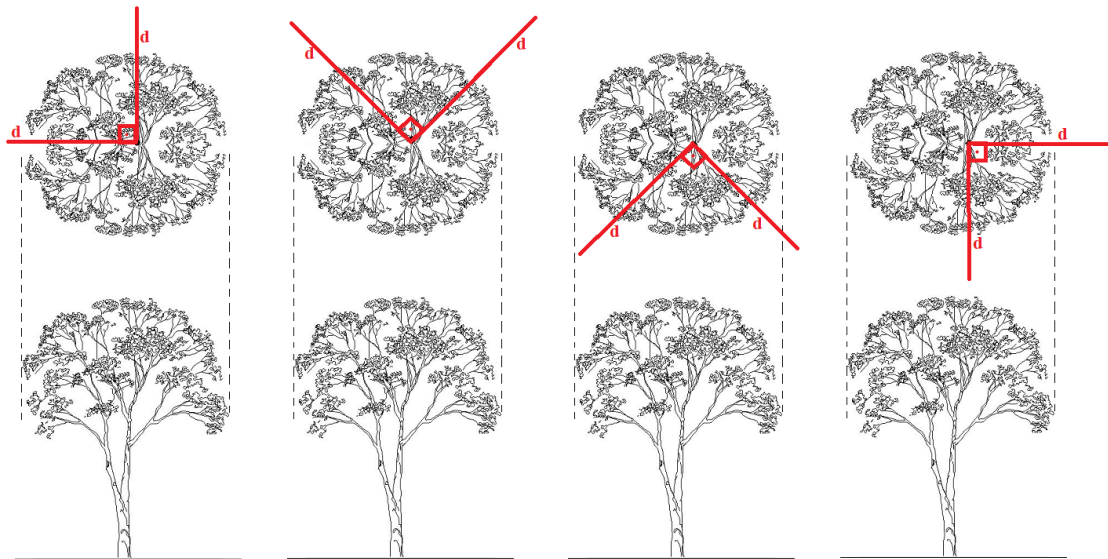


Figura 3: Procedimento de obtenção das fotografias das copas das árvores, sendo as duas fotos tomadas em ângulo de 90° , à uma distância (d) entre o tronco da árvore e o fotógrafo, numa posição distinta conforme adequação do espaço na rua e no parque.

Para auxiliar a vetorização e análise das imagens foi utilizada uma escala de 1,5 m x 0,5 m, dividida em faixas longitudinais de 0,5 m em branco e preto, fixada em alinhamento perpendicularmente ao tronco, a 1,30 m de altura (DAP), conforme metodologia adaptada de Durlo et al. (2004) (Figura 4).

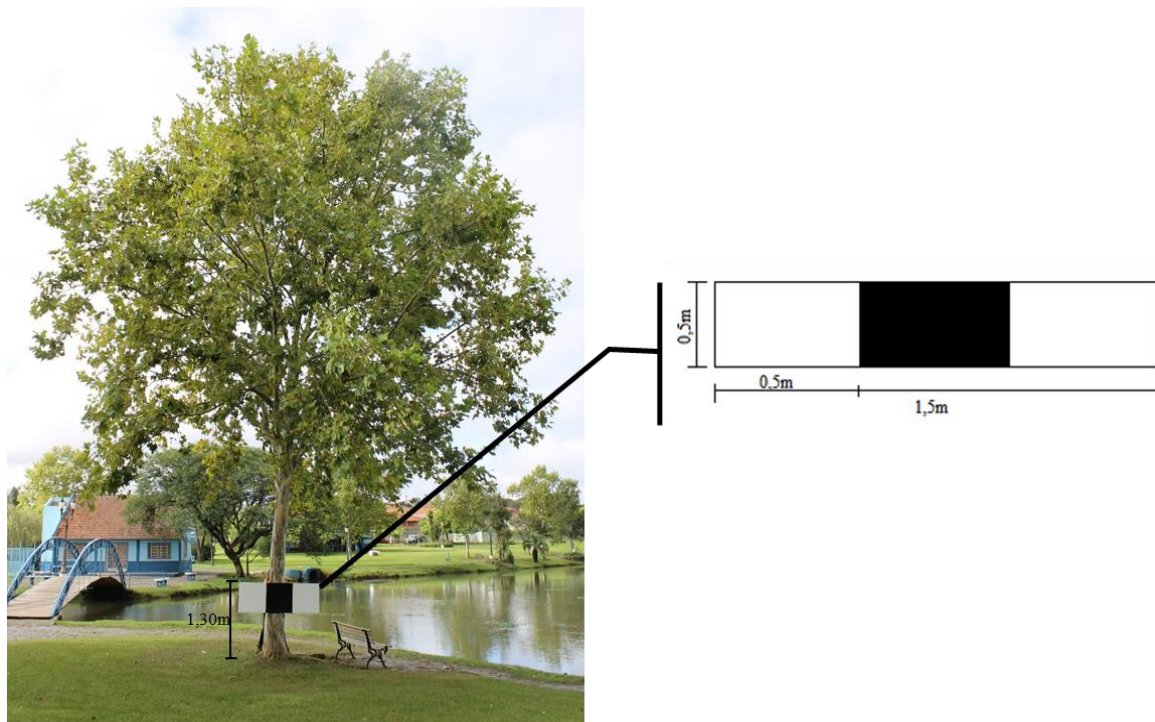


Figura 4: Detalhes dimensionais (1,5 x 0,5 m) e localização da inserção da escala no tronco da árvore.

A vetorização das copas para determinação da área em plano vertical foi realizada por meio do processamento das imagens no *software* ImageJ 1,51 j8, o qual permite, por meio da calibração das medidas da escala espacial, a realização do cálculo da área vetorizada, sendo essa a área de copa real de interesse.

Para fins comparativos, as estimativas da área de projeção da copa em plano vertical foram feitas por meio de equações de cinco figuras geométricas: retângulo (Equação 3); elipse (Equação 4); círculo (Equação 5); triângulo (Equação 6); parábola (Equação 7), conforme provável correspondência à forma das copas das árvores.

Para levantamento da altura das árvores (h) e altura de copa (h_{cp}), foi utilizado o 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 (Equação 1), conforme exemplificados na Figura 1.

$$A_{cp_{\text{retângulo}}} = h_{cp} \cdot D_{cp} \quad (3)$$

$$A_{cp_{\text{elipse}}} = \pi \cdot \frac{h_{cp}}{2} \cdot \bar{r}_8 \quad (4)$$

$$A_{cp_{\text{círculo}}} = \pi \cdot \bar{r}_8^2 \quad (5)$$

$$A_{cp_{\text{triângulo}}} = \frac{D_{cp} \cdot h_{cp}}{2} \quad (6)$$

$$A_{cp\text{parábola}} = \frac{2}{3} \cdot D_{cp} \cdot h_{cp} \quad (7)$$

Em que: 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).

Para comparar os métodos de estimativas da área de copa em projeção vertical adotou-se um Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), considerando cada árvore como um bloco, com seis tratamentos correspondentes aos métodos de estimativa da área de copa vertical (real, retângulo, elipse, círculo, triângulo e parábola). O efeito da heterogeneidade das variâncias foi ajustado com a transformação dos dados por Box-Cox (BOX; COX, 1964), o qual realiza as transformações por meio da teoria da máxima verossimilhança, de forma a aproximar os intervalos de confiança e reduzir a dispersão dos resíduos. Após constatada a homocedasticidade pelo teste de Bartlett ao nível de 5,0% de probabilidade de erro, foi realizada a ANOVA e posteriormente teste de Tukey, para comparação das médias dos tratamentos, ao nível de 5,0% de probabilidade de erro.

4.3.3. Volume de copa

Por meio das mensurações de diâmetro de copa e altura de copa, já detalhadas nos itens anteriores (4.3.1 e 4.3.2), para cada uma das espécies foram estimados os volumes das copas (V_{cp}) por meio de equações de volumes de sólidos geométricos, conforme sugerido por Ludwig et al. (1975) e Jutras (2008), com a finalidade de determinar o espaço tridimensional de ocupação das árvores na área urbana. Dentre as figuras geométricas espaciais, utilizaram-se aquelas correspondentes às calculadas para área de projeção de copa vertical: paralelepípedo (Equação 8), elipsoide (Equação 9), esfera (Equação 10), cone (Equação 11) e parabolóide (Equação 12).

$$V_{cp\text{paralelepípedo}} = D_{cpNS} \cdot D_{cpLO} \cdot h_{cp} \quad (8)$$

$$V_{\text{cp elipsoide}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \frac{D_{\text{cpNS}}}{2} \cdot \frac{D_{\text{cpLO}}}{2} \cdot \frac{h_{\text{cp}}}{2} \quad (9)$$

$$V_{\text{cp esfera}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \bar{r}_8^3 \quad (10)$$

$$V_{\text{cp cone}} = \frac{\pi}{3} \cdot \bar{r}_8^2 \cdot h_{\text{cp}} \quad (11)$$

$$V_{\text{cp paraboloides}} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \bar{r}_8^2 \cdot h_{\text{cp}} \quad (12)$$

Em que: V_{cp} = volume de copa (m^3);

h_{cp} = altura de copa (m);

\overline{D}_{cp} = diâmetro médio da copa conforme o sentido cardinal (m);

\bar{r}_8 = raio médio da copa (m).

Para comparar os volumes de copa calculado por meio das equações das figuras geométricas adotou-se um Delineamento em Blocos Casualizados (DBC), considerando cada árvore como um bloco, com cinco tratamentos correspondentes aos métodos de estimativa da área de copa vertical (cone, paralelepípedo, esfera, paraboloides e elipsoide). O efeito da heterogeneidade das variâncias foi ajustado com a transformação dos dados por Box-Cox (BOX; COX, 1964). Assim, depois de constatada a homocedasticidade das variâncias pelo teste de Bartlett ao nível de 5,0% de probabilidade de erro, foi realizada a ANOVA e posteriormente teste de Tukey, para comparação das médias dos tratamentos, ao nível de 5,0% de probabilidade de erro.

Por meio dos volumes de copa das árvores calculados pelas figuras geométricas espaciais determinou-se a densidade existente no volume dessas copas, ou seja, o quanto do volume era, realmente, um conjunto de folhas e galhos (massa vegetal). Para essa avaliação, foram tiradas quatro fotografias da base da copa, de baixo para cima, equidistantes em 90°, a 40 cm do tronco e a 1,30 m de altura do solo (Figura 5).

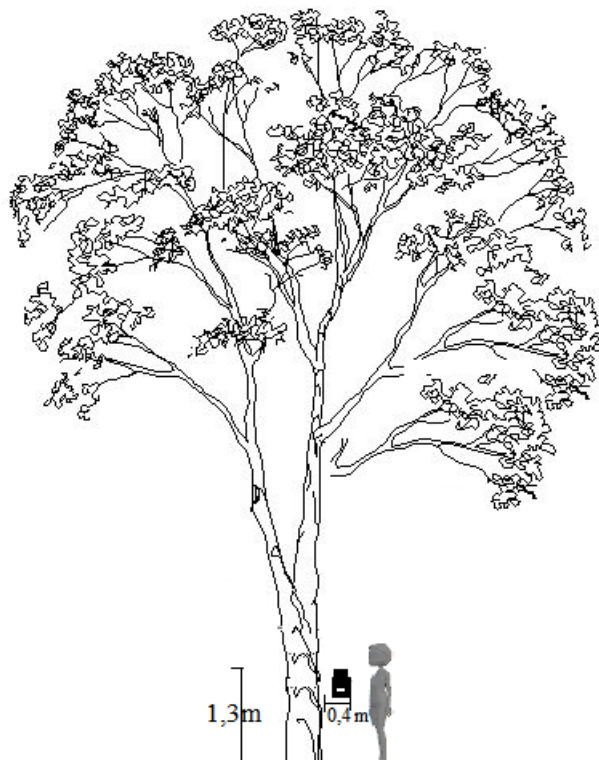


Figura 5: Procedimento adotado para a obtenção das fotografias para determinação da densidade da copa, onde o indivíduo está com câmera a uma distância de 0,4 m do tronco da árvore, à 1,3 m do solo (DAP).

As imagens obtidas foram analisadas no *software* MultiSpec, Version 2018.01.04, para determinação da quantidade de massa vegetal (folhas e galhos) e espaços vazios (céu) presentes na copa das árvores de cada uma das espécies. O *software* permitiu conhecer qual a porcentagem de massa existente na área de cada uma das fotografias. Assim, as porcentagens de copa geradas pela média das quatro fotos por árvore foram utilizadas para ajustar o valor dos volumes de copa (m³) sólidos calculados para a figura geométrica espacial que mais se aproximou do valor real no cálculo da área, verificado por meio da vetorização de imagens, descrito no item 4.3.2.

Após constatada a homocedasticidade das variâncias pelo teste F a 5,0% de probabilidade de erro, fez-se o teste de médias T presumindo variâncias equivalentes para os dados de volume de copa em densidade e sem considerar a densidade, apenas o volume no cálculo.

4.3.4. Caracterização Morfométrica

Com objetivo de caracterizar as relações dimensionais nas árvores e descrever o crescimento para cada árvore individualmente, realizou-se o cálculo dos índices morfométricos (Figura 6): Proporção de Copa (PC), Grau de Esbeltez (GE), Índice de Saliência (IS), Índice de Abrangência (IA) e Formal de Copa (FC), com equações demonstradas por Roman et al. (2009) e Bobrowski (2015).

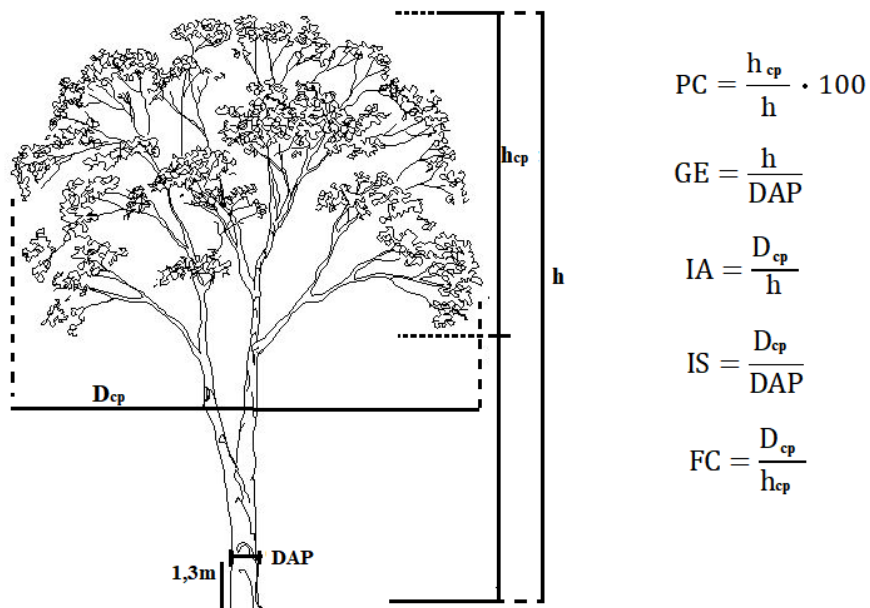


Figura 6: Representação das variáveis coletadas para cálculo dos índices morfométricos em árvores adultas de *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*, em que: PC = proporção de copa; GE = grau de esbeltez; IA = índice de abrangência; IS = índice de saliência; FC = Formal de Copa; h_{cp} = altura de copa (m); h = altura total da árvore (m); DAP = diâmetro a altura do peito (cm), 1,30 m do solo; D_{cp} = diâmetro de copa (m).

Fonte: Adaptado de Roman et al. (2009).

Utilizou-se as equações dos índices morfométricos GE, IS e FC para realizar estimativas, de forma que, com auxílio de medidas práticas de serem levantadas a campo, fosse possível estimar dimensões, que as vezes são de difícil obtenção na floresta urbana. Assim sendo, a média dos índices das árvores mensuradas serviram como valor fixo conhecido para as seguintes estimativas: altura total (Equação 13), diâmetro de copa (Equação 14) e altura de copa (Equação 15). As relações alométricas utilizadas foram as equações de GE e IS junto ao DAP, para estimar \hat{h} e \widehat{D}_{cp} , respectivamente. E a relação diâmetro de copa e Formal de Copa (FC) para obtenção de \widehat{h}_{cp} .

$$\hat{h} = \overline{GE} \cdot DAP \quad (13)$$

$$\widehat{D}_{cp} = \overline{IS} \cdot DAP \quad (14)$$

$$\widehat{h}_{cp} = \frac{D_{cp}}{FC} \quad (15)$$

Em que: \hat{h} = altura estimada (m);

\overline{GE} = grau de esbeltez médio;

DAP = diâmetro a altura do peito (cm);

\widehat{D}_{cp} = diâmetro de projeção de copa estimado (m);

\overline{IS} = índice de saliência médio;

D_{cp} = diâmetro de copa (m);

FC = Formal de Copa.

Para classificar as formas das copas de cada árvore e espécie foi determinada a conformação da copa pelo índice Formal de Copa, conforme Bobrowski e Biondi (2017). Para

isso, foram adotadas três classes de conformação: Classe 1 ($FC 0,25 \leq 0,9$), Classe 2 ($FC 0,9 \leq 1,1$) e Classe 3 ($FC 1,1 \leq 4,0$) (Figura 7). Os indivíduos pertencentes à Classe 1 foram considerados como Formal de Copa elíptica vertical, os da Classe 2 foram considerados arredondados e da Classe 3 foram considerados como forma de copa elíptica horizontal.

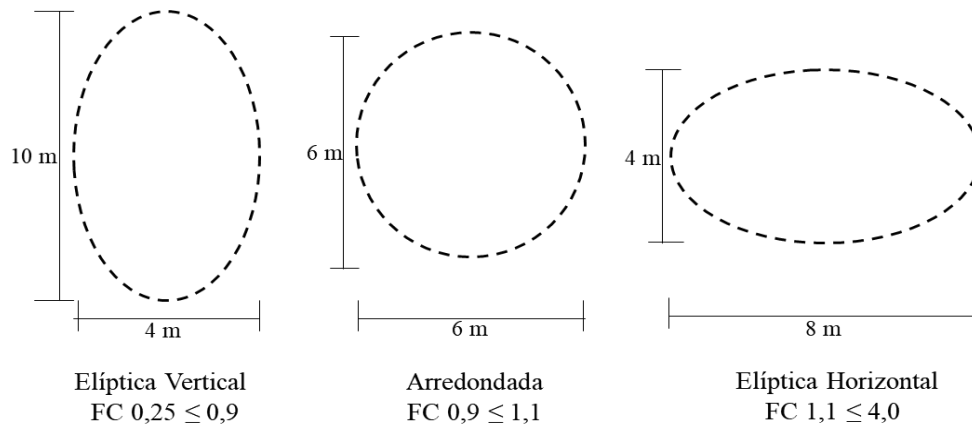


Figura 7: Conformação das copas a partir das classes de formal de copa.

Fonte: Adaptado de Bobrowski e Biondi (2017).

Os dados das estimativas por meio das relações morfométricas foram submetidos ao teste F, a 5,0% de probabilidade de erro, para verificação da homocedasticidade das variâncias. Após, foram realizadas comparações entre os valores reais mensurados e os estimados por meio de um teste t presumindo variâncias equivalentes a 5,0% de probabilidade de erro, com utilização do *software* Excel. A análise descritiva de cada índice morfométrico foi realizada com auxílio *software* Excel, em cada uma das espécies, *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*.

4.3.5. Modelagem da projeção de copa de árvores urbanas

Para estimar o diâmetro de copa (D_{cp}) de cada uma das espécies foram selecionados e testados seis modelos comumente utilizados na literatura (SCHUMACHER; HALL, 1933; NUTTO et al., 2001; TONINI; ARCO VERDE, 2005; WEBER, 2007; SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008; SEMENZATO et al., 2011; MARTIN et al., 2012; NORTH, 2013; PEPER et al., 2014; PRETZSCH et al., 2015). Estes modelos utilizam o DAP como variável independente e, junto a essa, a altura total da árvore, em um dos modelos (Tabela 1).

Utilizou-se o diâmetro de copa e área de copa como variável dependente nos modelos testados porque são variáveis que tem relação com a oferta de benefícios ecossistêmicos e valoração econômica de árvores urbanas (TROXEL et al., 2013; BINKLEY et al., 2013).

Tabela 1: Modelos genéricos testados para estimar o diâmetro ou área (Y) de copa de árvores das espécies *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*.

Modelo	Autor	Equação
$Y_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \varepsilon_i$	Nutto et al. (2001).	(16)
$\ln Y_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln DAP$	Tonini e Arco Verde (2005), Pretzsch et al. (2015).	(17)
$Y_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \varepsilon_i$	Weber (2007), Schneider e Schneider (2008), Martin et al. (2012), North (2013).	(18)
$Y_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2 + \beta_3 \cdot DAP^3 + \varepsilon_i$	Semenzato et al. (2011), North (2013).	(19)
$\ln Y_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln DAP + \beta_2 \cdot \ln h + \varepsilon_i$	Schumacher-Hall (modificado) (1933).	(20)
$\ln Y_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln (DAP + 1) + \varepsilon_i$	Peper et al. (2014).	(21)

Em que: Y = diâmetro de projeção de copa (m) ou área de copa (m²); DAP = Diâmetro do tronco à altura do peito (cm); h: altura total da árvore (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = coeficientes a serem estimados por meio da regressão; ε_i = erro aleatório.

O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi utilizado para traçar as variáveis independentes com maior afinidade de corresponder com as variáveis de interesse (Dcp e/ou Acp). Assim, utilizou-se da Regressão Linear Múltipla Stepwise para determinar as variáveis com respostas significativas (p-valor < 0,05) na estimativa da variável dependente, considerando como variáveis independentes DAP e h e diferentes transformações que não constam nos modelos tradicionais. O *software* utilizado foi o StatSoft, Inc. (2014) STATISTICA (Data Analysis Software System), versão 12. Tais metodologias de seleção de variáveis com maior afinidade estatística foram realizadas para adequação do modelo nas estimativas que poderiam não constar na literatura, sendo que, as variáveis independentes utilizadas foram aquelas de prática obtenção a campo.

4.3.6. Modelagem da altura total

Visto que a altura total das árvores é uma variável importante para modelar a dimensão da copa, essa variável foi estimada por meio de relações hipsométricas, em que se utiliza o DAP, medida de fácil obtenção a campo, como variável independente. Desta forma, em situações onde não se consiga medir essa variável, que demanda uma certa distância do indivíduo a ser medido e acurácia do medidor (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2014), torna-se possível conhecer a altura total e estimar o diâmetro de copa das árvores com qualidade e eficácia (Tabela 2). Após o ajuste dos modelos no *software* Excel, fez-se a análise estatística para a seleção do melhor modelo conforme tópico 4.3.8 (Análise e Seleção de Modelos).

Tabela 2: Modelos testados para estimar a altura total (h) em árvores de *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*.

Modelo	Autor	Equação
$h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{1}{DAP}\right) + \varepsilon_i$	Curtis	(22)
$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \left(\frac{1}{DAP}\right) + \varepsilon_i$	Curtis (modificado)	(23)
$\ln h = \beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(DAP) + \varepsilon_i$	Stoffels e Van Soest	(24)

Em que: DAP = diâmetro do tronco à altura do peito (cm); h: altura total da árvore (m); β_0 , β_1 , β_2 , β_3 = coeficientes a serem estimados por meio da regressão; ε_i = erro aleatório.

4.3.7. Modelagem do crescimento diamétrico de árvores urbanas

Foram retiradas duas amostras cilíndricas de madeira (rolos de incremento) à 1,30 m de altura (DAP) com auxílio do Trado de Pressler (dimensões de 5 mm de diâmetro por 40 cm de comprimento) para realização da Análise de Tronco (ANATRO) parcial. Para abranger todos os anéis de crescimento, as tradagens foram realizadas com objetivo de atingir a medula da árvore e, para uma melhor representatividade, os dois rolos de incremento foram retirados perpendiculares entre si (Figura 8-A).

Todas as 30 árvores de *Platanus x acerifolia* foram contempladas, entretanto nas árvores de *Handroanthus heptaphyllus* não foi possível amostrar todas as árvores, devido a alta densidade da madeira, de 0,90 a 1,07 g.cm⁻³ (CARVALHO, 2003). Assim, nessa espécie, foram retiradas duas amostras nas 14 primeiras árvores e outras amostras únicas em mais quatro indivíduos, totalizando 18 árvores amostradas.

Os orifícios deixados nas árvores pela extração do rolo de incremento foram vedados com cera de abelha *in natura*, tal qual proposto por Stepka (2012) e Cubas (2015) para que nenhum fator externo causasse danos e prejudicasse o desenvolvimento futuro da planta (Figura 8-B).

Os rolos de incremento foram acondicionados nos “porta-rolos” e fixados inicialmente com fita adesiva, sendo devidamente identificados (Figura 8-C). Após a secagem, durante aproximadamente 15 dias, as amostras foram fixadas com cola branca, com as fibras no sentido perpendicular ao suporte de madeira (“porta-rolos”), para que mantivessem a posição em que foram retiradas das árvores, permitindo assim a leitura dos anéis de crescimento. Os rolos de incremento foram lixados com uma lixadeira orbital ¼ de folha com diferentes gramaturas de lixas (80, 100, 120, 220, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 grãos.mm⁻²) (Figura 8-D).

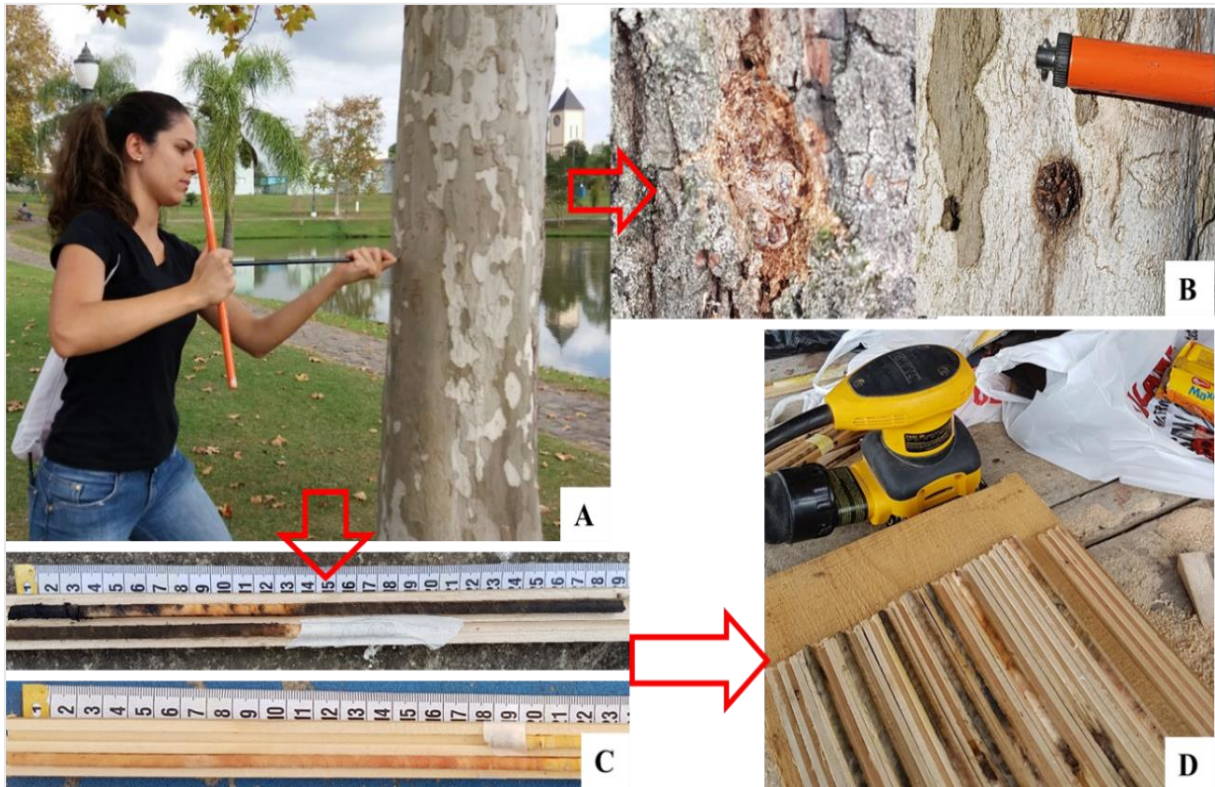


Figura 8: Coleta de rolos de incremento com trado de Pressler (A), obstrução dos orifícios com cera de abelha (B), alocação das amostras nos “porta-rolos” (C), lixamento dos rolos de incremento/amostras de *Handronathus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*.

A leitura e determinação dos anéis anuais de crescimento seguiram as descrições anatômicas da madeira para ambas as espécies estudadas, conforme descrito a seguir. Mattos et al. (2003) destacaram que *Handronathus heptaphyllus* possui anéis de crescimento anuais pouco distintos, sendo esses delimitados por linhas tangenciais desenvolvidas pelo achatamento e espessamento das fibras, junto à faixas interrompidas definidas pelo parênquima marginal (Figura 9-A). Enquanto que as espécies do gênero *Platanus*, segundo Schoch et al. (2004) e Busch et al. (2008) possuem potencial para estudos dendrocronológicos, com anéis anuais porosos, raios grandes, placas de perfuração simples e escariforme, com vasos opostos em linhas horizontais (Figura 9-B).

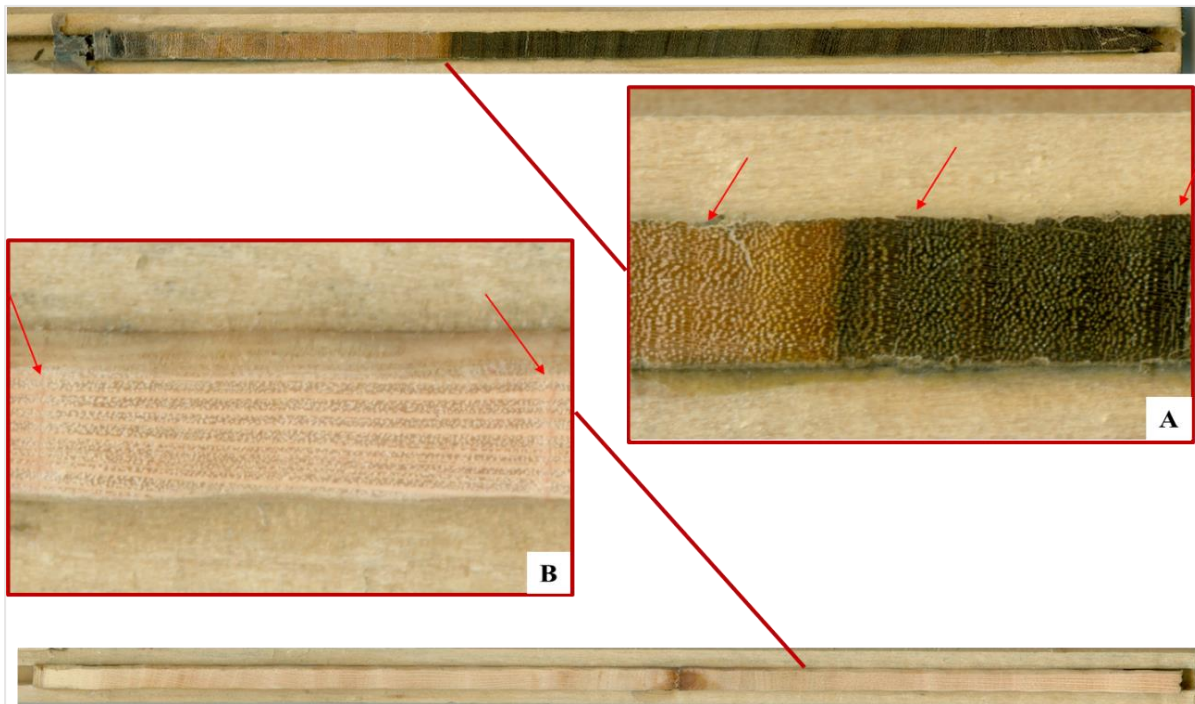


Figura 9: Detalhes da marcação dos anéis de crescimento em *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B).

Os anéis de crescimento foram marcados seguindo as características de cada uma das espécies, com auxílio de Lupa Estereoscópica. Após conferência da marcação, foi realizada a mensuração dos anéis de crescimento com o aparelho LINTAB 6 *Tree-ring station* conectado ao *software* TSAP-Win, com precisão de 0,01 mm no Centro Integrado de Pesquisas em Biomassa, Biotecnologia e Bioenergia (BIO 3) na Unicentro, *Campus* de Irati-PR.

Para melhor controle dos dados e redução dos erros de sincronização, os anéis foram submetidos a datação visual entre o par de amostras da mesma árvore e após conferência de possíveis erros de marcação e/ou medição, fez-se datação visual novamente entre todas as árvores (CANETTI, 2015; GHOLAMI et al., 2015).

Foram realizados cálculos de incremento anual e a análise de crescimento diamétrico de cada uma das espécies no *software* Excel. Para gerar a curva média de produção em diâmetro ao longo dos anos, utilizou-se o modelo biológico de Chapman-Richards (25), ajustado no StatSoft, Inc. (2014) *STATISTICA (Data Analysis Software System)*, versão 12.

$$DAP_{cc} = \beta_0(1 - e^{-\beta_1 I})^{\beta_2} \quad (25)$$

Em que:

DAP_{cc} = Diâmetro à altura do peito com casca (cm);

I = idade (anos).

Para estimar o DAP com casca foi necessário definir a relação entre DAP_{cc} (com casca) em função do DAP_{sc} (sem casca), pois no rolo de incremento é possível verificar os diâmetros ao longo do tempo sem casca, todavia quando se realiza a medição a campo a tomada do DAP com suta, ou CAP com fita métrica, a casca está incluída. Dessa forma, o modelo a seguir foi ajustado para estimar o DAP_{cc} em cada uma das espécies (Equação 26), sendo que a constante β_0 foi considerada zero em ambos os ajustes para que não houvesse superestimativa de casca em diâmetro zero.

$$DAP_{cc} = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP_{sc} + \varepsilon_i \quad (26)$$

Em que:

DAP_{cc} = Diâmetro à altura do peito com casca (cm);

DAP_{sc} = Diâmetro à altura do peito sem casca (cm).

A partir dessas estimativas foi possível calcular qual seria o diâmetro de copa (D_{cp}) estimado ao longo dos anos em função do DAP (Equação 25), utilizando os mesmos modelos ajustados no item 4.3.5 (Modelagem do Diâmetro de Copa). Isso permite, portanto, estimar o espaço ocupado pelas árvores em diferentes idades para condições de clima e tipologia específicas das áreas de estudo. Tal qual os demais modelos, esses também foram analisados estatisticamente por meio das análises do item 4.3.8.

4.3.8. Análise e Seleção dos Modelos

Os modelos ajustados foram avaliados por meio dos seguintes critérios estatísticos: Erro Padrão de estimativa (S_{yx}), Coeficiente de determinação (R^2), Coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e Distribuição gráfica dos resíduos.

Segundo Machado et al. (2002), o erro padrão da estimativa (Equações 27 e 28) é uma medida estatística de dispersão média entre os valores observados e estimados ao longo da regressão, ou seja, avalia o erro médio e quanto menor for esse valor, melhor a qualidade do ajuste.

O Coeficiente de determinação (Equações 29 e 30) é uma estatística capaz de expressar a variação entre a compatibilidade das variáveis, dependente e independente. Quanto mais alto o valor de R^2 , melhor o ajuste da equação (MACHADO et al., 2002).

Foi realizada a distribuição gráfica dos resíduos para verificar se havia tendências nas estimativas realizadas pelos modelos.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{n - p}} \quad (27)$$

$$S_{yx}(\%) = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (28)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{total}} \quad (29)$$

$$R^2_{adj} = 1 - (1 - R^2) \cdot \left(\frac{n - 1}{n - p}\right) \quad (30)$$

$$\text{Res (\%)} = \frac{y_i - \hat{y}}{y_i} \cdot 100 \quad (31)$$

Em que:

S_{yx} = Erro Padrão de Estimativa para a variável de interesse;

S_{yx} (%) = Erro Padrão de Estimativa em Porcentagem;

n = número de dados observados;

p = número de coeficientes do modelo;

R^2 = Coeficiente de Determinação;

R^2_{adj} = Coeficiente de Determinação Ajustado;

Res (%) = Resíduos em porcentagem;

SQ_{res} = Soma dos Quadrados dos Resíduos;

SQ_{total} = Soma dos Quadrados Total;

\hat{y} = Variável estimada;

y_i = Variável observada;

\bar{y} = Valor médio observado para a variável de interesse.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Determinação da área de copa em plano horizontal

Não foi constatada diferença significativa (p -valor $> 0,01$) entre os métodos de determinação da área de copa em projeção horizontal (tratamentos), tanto para *Handroanthus heptaphyllus* quanto para *Platanus x acerifolia* (Tabela 3). A diferença observada para os blocos corresponde às características distintas de crescimento entre as árvores, pois mesmo sendo locais com condições ambientais aparentemente homogêneas para cada grupo de árvores avaliado, pequenas variações nas condições do solo (umidade, temperatura e outros) podem condicionar singelas diferenças na morfometria das árvores.

Tabela 3: Tabela da Análise de Variância para a comparação da área de copa horizontal calculada com 8, 4 e 2 raios de projeção de copa em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

FV	GL	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>				<i>Platanus x acerifolia</i>			
		SQ	QM	F	p-valor	SQ	QM	F	p-valor
Bloco	29	181738	6266,8	17,14	$2,0 \times 10^{-16}$	105659	3643,4	57,75	$2,2 \times 10^{-16}$
Tratamento	2	2780	1389,9	3,8	0,0281	300	150,1	2,38	0,1017
Resíduo	58	21210	365,7			3659	63,1		
Total	89	205728				109619			

Em que: FV = fontes de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

Costa et al. (2013), ao estudar a influência do número de raios na estimativa de área de copa *Araucaria angustifolia* constataram não haver diferença quando se considera quatro ou oito raios, para esta espécie que cresce dominando o dossel da floresta. No entanto, os autores afirmaram que existe um erro no cálculo da área quando se utiliza menor número de raios e que, apesar de não existir diferença significativa, o método dos oito raios de copa é considerado mais acurado.

Rosot et al. (2014) afirmaram que podem ocorrer dois tipos de erros nas estimativas de área de projeção de copa. O primeiro está relacionado à utilização da equação da área do círculo para o cálculo da área transversal. O segundo está relacionado à seleção e quantidade dos raios mensurados a campo. Entretanto, o primeiro erro pode ter sido minimizado no presente estudo, pois os raios médios foram calculados com a equação da média quadrática e,

apesar de não apresentar diferença estatística com a média aritmética, segundo Prestzch et al. (2015), essa é uma maneira de reduzir os erros gerados no cálculo de área de projeção de copa.

Constatou-se diferença significativa ($p < 0,01$) entre os diferentes métodos (raios cardeais e os pares dos raios cardeais) de estimativas de área de copa em projeção horizontal os raios correspondentes a diferentes faces, para ambas espécies estudadas (Tabela 4).

Tabela 4: Análise de Variância para a comparação da área de copa horizontal calculada com raio Norte, Leste, Oeste e Sul e para os raios Norte/Leste, Sul/Oeste, Norte/Sul, Leste/Oeste em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

<i>Handroanthus heptaphyllus</i>						<i>Platanus x acerifolia</i>			
Norte – Leste – Sul – Oeste									
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	SQ	QM	F	p-valor
Bloco	29	219628	7573	3,99	$3,02 \times 10^{-7}$	144552	4984,5	6,98	$7,82 \times 10^{-13}$
Tratamento	3	108268	36089	19,02	$1,42 \times 10^{-9}$	61710	20570	28,82	$4,94 \times 10^{-13}$
Resíduo	87	165052	1897			62099	713,8		
Total	119	492947				268361			

Norte/Leste- Sul/Oeste - Norte/Sul - Leste/Oeste - Norte/Oeste - Sul/Leste									
FV	GL	SQ	QM	F	p-valor	SQ	QM	F	p-valor
Bloco	29	329441	11360	19,96	$2,2 \times 10^{-16}$	2168828	7477,8	34,92	$2,2 \times 10^{-16}$
Tratamento	5	54134	10827	19,02	$1,6 \times 10^{-14}$	30855	6171	28,82	$2,2 \times 10^{-16}$
Resíduo	145	82526	569,1			31049	214,1		
Total	179	466101				278732			

Em que: FV = fontes de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

O teste de Tukey indicou que as áreas de projeção de copa calculadas com os raios medidos no sentido Norte e Leste demonstram-se semelhantes entre si, bem como, Sul e Oeste. Sendo assim, a área calculada com a média dos dois raios N-L se distingue estatisticamente da S-O, em que a primeira superestima a área e a segunda subestima a área de copa. Os demais quatro pares de raios (N-S; L-O; S-L e N-O) são estatisticamente iguais na determinação da área de copa (Figura 10).

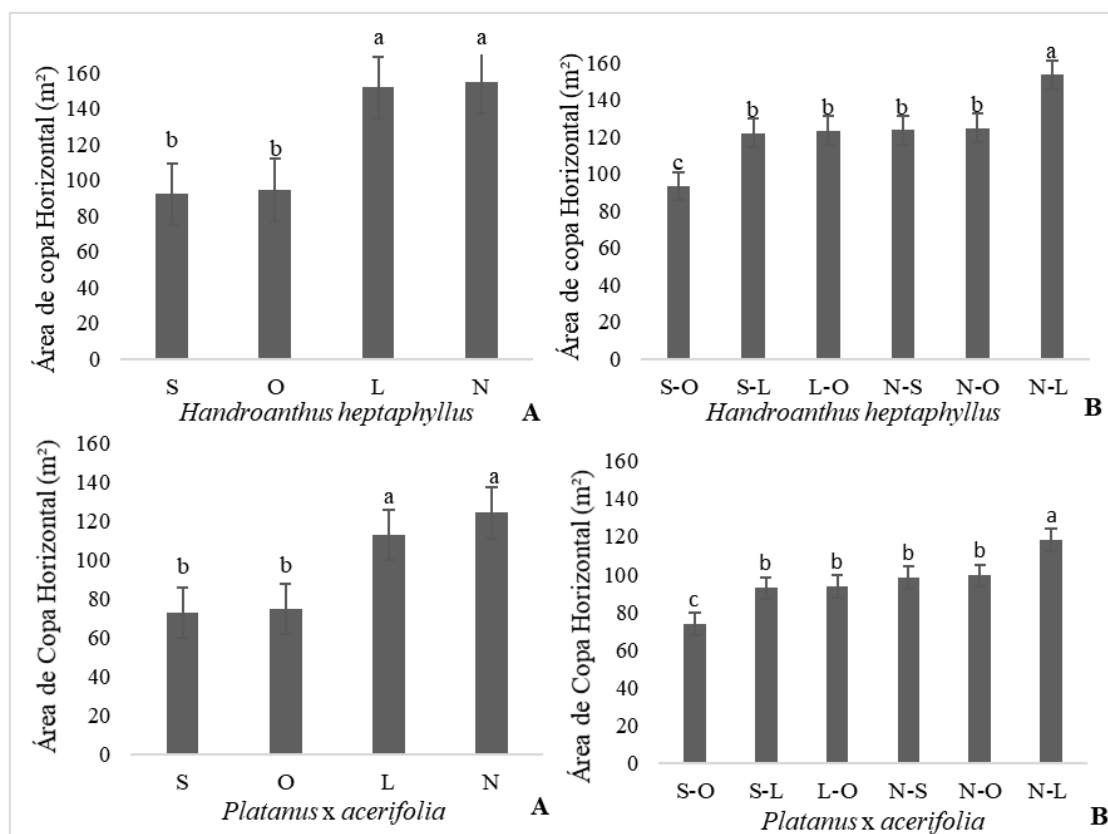


Figura 10: Testes de médias para a área de projeção de copa horizontal estimada a partir do raio na direção Norte, Leste, Oeste e Sul (A) e para a média entre os raios Norte/Leste, Sul/Oeste, Norte/Sul, Leste/Oeste, Norte/Oeste e Norte/Leste (B) em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 1,0% de probabilidade de erro.

As comparações entre o crescimento da copa nas direções cardeais (N, S, L e O) permitiram afirmar que, tanto para *Handroanthus heptaphyllus* plantados na arborização de calçadas, quanto para *Platanus x acerifolia* presentes no parque, o lado que abrange o Norte e o Leste cresce mais do que o lado Sul e Oeste (Figura 11). Dessa maneira, as espécies estudadas, com características morfológicas distintas e localizadas em diferentes tipologias da floresta urbana, demonstraram semelhança no modo de crescimento dos galhos (medidos com a projeção do raio de copa das árvores) e, conseqüentemente, na expressão da área de copa em projeção horizontal.

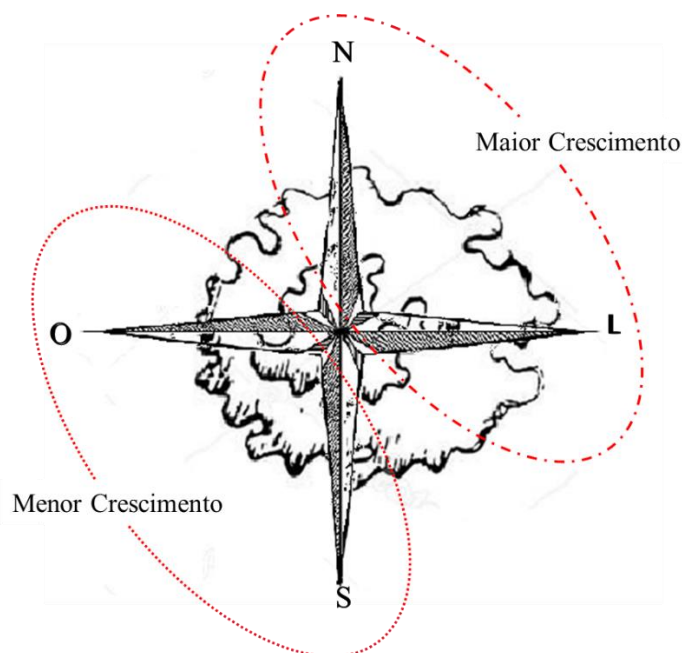


Figura 11: Esquema representativo do crescimento da copa conforme a posição cardinal dos raios, em que N-L representam os lados que cresceram mais e S-O o menor crescimento de copa.

A seleção de dois raios de copa tomados na posição N-S ou L-O torna a representação média do crescimento da copa, porque considera um raio do lado que cresce menos (S ou O) e outro raio do lado de maior crescimento (N ou L). Assim, quando se seleciona os raios N-S ou L-O é possível manter semelhança na determinação da área de copa horizontal medida com oito, quatro ou dois raios. Contudo, se por ventura forem selecionados os raios Norte-Leste poderá ocorrer uma superestimativa ou se forem selecionados os raios Sul-Oeste haverá subestimativas do tamanho da copa, o que não irá corresponder com o real tamanho da copa.

5.2. Determinação da área de copa em plano vertical

Para ambas as espécies estudadas, *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*, constatou-se diferença estatística significativa entre os tratamentos avaliados (área real, retângulo, elipse, círculo, triângulo e parábola) (Tabela 5).

Tabela 5: Análise de variância para os métodos de estimativa da área de copa em projeção vertical para duas espécies florestais presentes na floresta urbana de Irati-PR.

FV	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>					<i>Platanus x acerifolia</i>			
	GL	SQ	QM	F	p-valor	SQ	QM	F	p-valor
Bloco	29	15,48	0,5338	47,1	2,2x10 ⁻¹⁶	1660	57,243	111,57	2,2x10 ⁻¹⁶
Tratamento	5	7,78	1,56	137,41	2,2x10 ⁻¹⁶	805,45	161,09	313,97	2,2x10 ⁻¹⁶
Resíduo	145	1,64	0,011			74,4	0,513		
Total	179	24,91				2539,9			

Em que: FV = fontes de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

Da mesma forma que para a área de copa em projeção horizontal, a variação observada entre blocos (Tabela 5) se deve às diferentes formas de crescimento das árvores urbanas, que mesmo estando no mesmo ambiente, podem responder de formas individuais às interferências do meio urbanizado. Nowak et al. (1990), Schaudhammer et al. (2010) e Lawrence et al. (2012) afirmaram 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 diferenças de gênero, características locais específicas, práticas silviculturais e propriedades do solo.

A estimativa de área de copa vertical por meio da equação da área do triângulo foi a que mais se aproximou da área considerada real obtida por vetorização de imagem (Figura 11), não diferindo significativamente desta ($p > 0,05$).

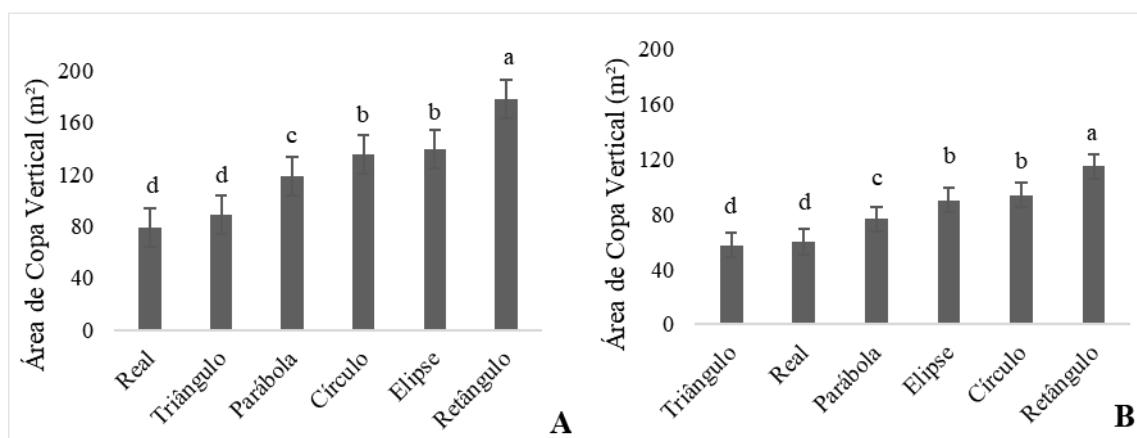


Figura 12: Valores médios das estimativas de área de projeção de copa vertical (m²) entre a figura real e as figuras geométricas planas (Triângulo, Parábola, Círculo, Elipse e Retângulo) em *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5,0% de probabilidade de erro.

As análises realizadas permitem afirmar que a figura geométrica do triângulo é a que mais se aproximou da área real de copa vertical em ambas as espécies, sendo que ocorreu

pequena subestimativa de 4,0% para *P. acerifolia* e superestimativa em 13,0% para *H. heptaphyllus*.

Diante da conformidade demonstrada pela estatística da área real (obtida por meio da vetorização de fotografias verticais) com a área do triângulo, supõe-se que a aproximação da figura geométrica do triângulo na projeção da área de copa vertical para as duas espécies seja devido ao ajuste da equação de área dessa figura geométrica, o qual possibilita uma melhor adequação quando se divide a altura total da copa por dois, formando dois triângulos análogos, de altura e base iguais, sendo assim semelhante a um losango (Figura 13).

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 isolados e livre de concorrência tendem a ter uma copa com multicamadas devido à eficiência fotossintética do indivíduo em crescimento livre de competição. Esses mesmos autores afirmaram que árvores individuais tendem a apresentar formato de copa hemisférica, sendo essa a melhor forma da árvore.

Gerstenberg e Hofmann (2016), ao estudar características de 24 espécies arbóreas para plantio em áreas urbanas, na Alemanha, afirmaram que árvores com altura de copa maior que a largura da copa tendem a um formato oval, enquanto que árvores de base de copa maior que a altura de copa se enquadram em formato de coníferas.

No presente estudo, as árvores de *Handroanthus heptaphyllus* avaliadas 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, concordando com a caracterização, nomeada como hemisférica, de Iwasa et al. (1985) para árvores individuais.

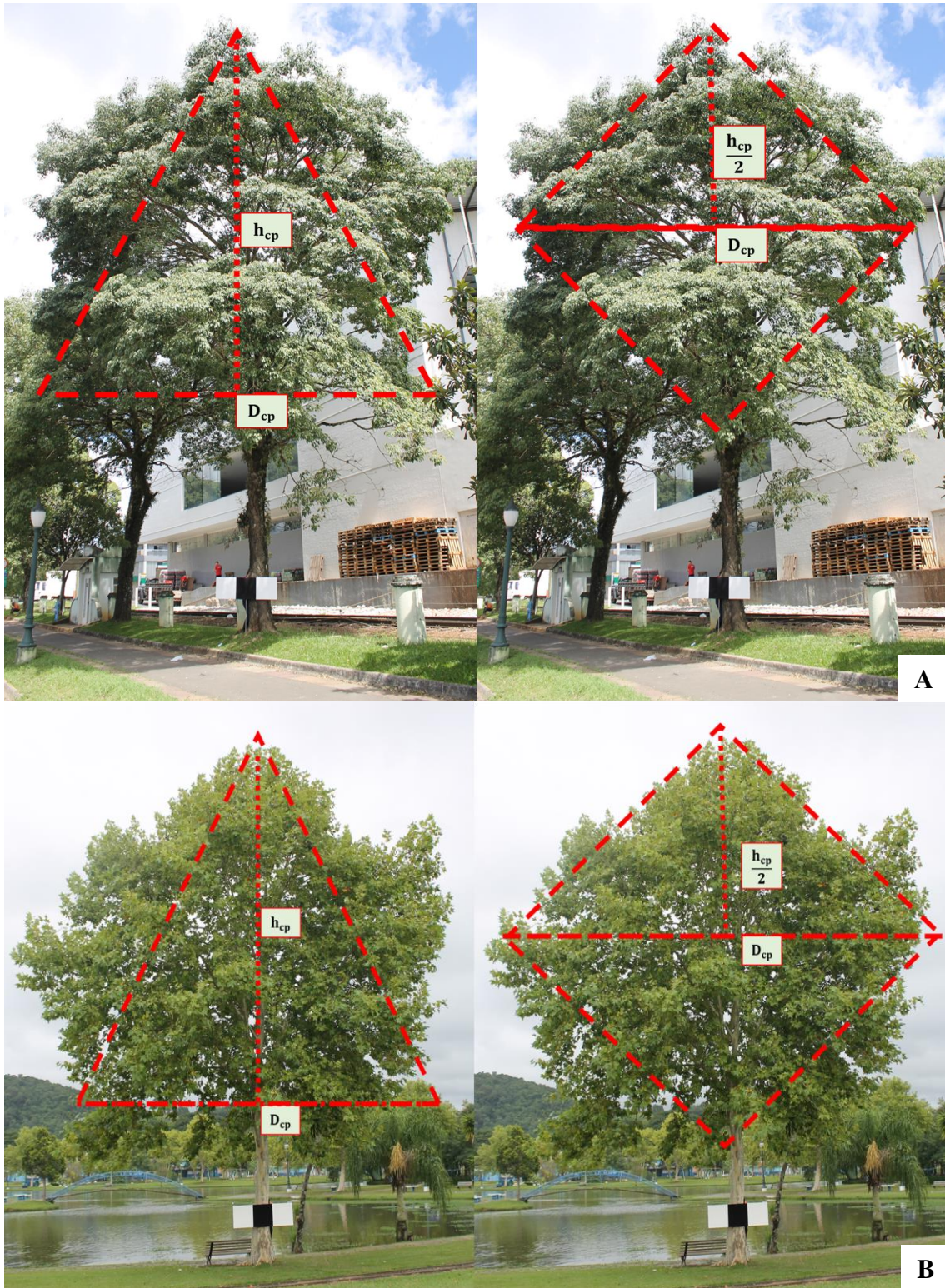


Figura 13: Ajuste da figura do triângulo com melhor conformação da área de projeção de copa vertical das árvores de *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR.

5.3. Volume de copa

Os volumes de copa calculados por meio das figuras geométricas espaciais (paralelepípedo, elipsoide, esfera, cone e parabolóide) diferiram significativamente a 5,0% de probabilidade de erro para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* (Tabela 6).

Tabela 6: Análise de variância para os métodos de estimativa do volume de copa para duas espécies florestais presentes na floresta urbana de Irati-PR.

FV	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>					<i>Platanus x acerifolia</i>			
	GL	SQ	QM	F	p-valor	SQ	QM	F	p-valor
Bloco	29	52,5	1,81	81,36	2,2x10 ⁻¹⁶	1519,88	52,41	150,43	2,2x10 ⁻¹⁶
Tratamento	4	39,51	9,88	443,89	2,2x10 ⁻¹⁶	1216,16	304,04	872,69	2,2x10 ⁻¹⁶
Resíduo	116	2,58	0,02			40,41	0,348		
Total	149	94,59				2776,46			

Em que: FV = fontes de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; F = F calculado.

Ludwin et al. (1975) estimaram o volume de copa de forma semelhante ao presente estudo, mas com foco na determinação da biomassa. Os autores consideraram um ajuste visual da forma da copa à figura geométrica espacial que melhor se encaixava à forma da copa e para *Larrea fridenfafa* utilizaram a forma do cone, considerando que a copa dessa espécie se parecia com um cone invertido. Jutras (2008) estimou o volume de copa para sete espécies utilizando a equação de um parabolóide (*upper-half*) e afirmou que essa pode ser uma metodologia aceita, pois gerou uma boa previsão do volume de copa, mas que se deve testar a introdução do fator de forma da copa nessa mesma equação.

Zhou e Zhou (2001) e Yin et al. (2011) também calcularam o volume de copa utilizando diferentes figuras geométricas conforme a melhor adaptação da forma da copa de árvores e arbustos presentes na arborização de Shanghai, China. Os autores afirmaram o quão importante é descrever a estrutura da floresta urbana, sendo que as estimativas por meio das figuras geométricas espaciais são informações de fácil obtenção, uma vez que permitem o cálculo do volume apenas pela mensuração do diâmetro e altura de copa.

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 espaciais, tendo em vista a impossibilidade de determinação do volume real de copa.

Por meio da figura geométrica do paraboloide 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 14).

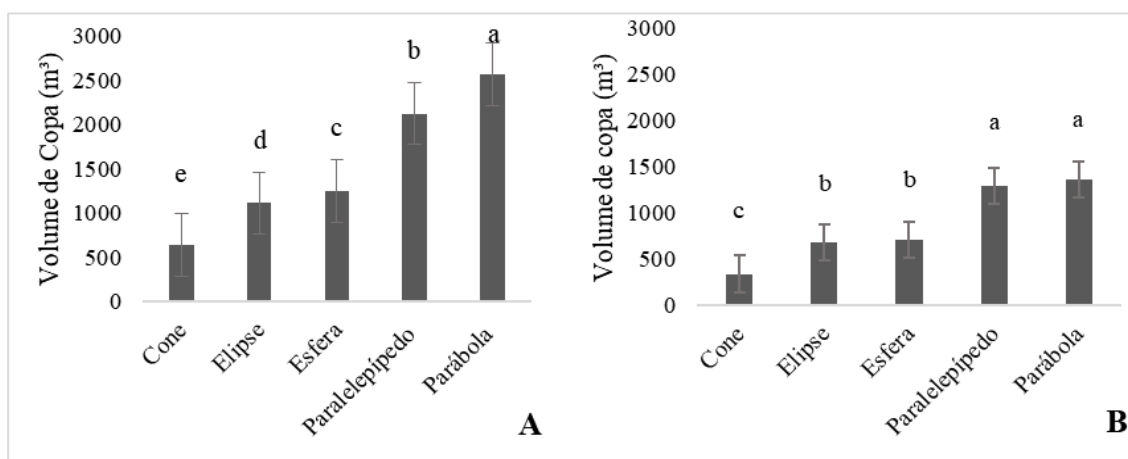


Figura 14: Diferenças estatísticas nas estimativas de volume de copa (m³), por meio das figuras geométricas espaciais: Cone, Elipsoide, Esfera, Paralelepípedo e Paraboloide em *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR. Médias seguidas pelas mesmas letras não diferem entre si ao nível de 5,0% de probabilidade de erro.

Yin et al. (2011) fizeram estimativas por parcela e citaram as equações das figuras geométricas utilizadas para cada uma das espécies estudadas, dentre essas o *Platanus orientalis*, classificado como forma oval. A espécie teve o volume de copa calculada pela expressão de $\pi \cdot Dcp^2 \cdot hcp / 6$. No presente estudo essa equação não foi utilizada para comparar com as demais, porque a análise realizada não levou em consideração apenas a conformidade visual das árvores.

No cálculo da densidade de copa foi possível constatar uma densidade de copa média de 77,0% para *H. heptaphyllus* e de 91,0% para *P. acerifolia*, sendo estes valores considerados altos. Tal fato pode justificar o motivo pelo qual a comparação entre volume calculado e o volume com densidade efetiva não ter apresentado diferença significativa (*H. heptaphyllus*: p-valor = 0,1578, *P. acerifolia*: p-valor = 0,4843).

McPherson e Rowntree (1993) afirmaram que, em termos de resfriamento do ambiente e economia de energia, uma copa mais ampla e com densidade de 75,0% ou mais são características almejadas. Assim, essas podem ser árvores indicadas ao plantio quando se tem por objetivo a regulação microclimática. Vale ressaltar que ambas espécies estudadas são caducifólias e perdem as folhas durante os meses mais frios do ano.

De acordo com Silva et al. (2007), a densidade de copa das árvores está diretamente relacionada ao tipo de arquitetura e essa é uma variável importante na arborização urbana para a quantificação do conforto ambiental, sendo que a densidade de copa pode ser rala, intermediária ou densa.

5.4. Caracterização Morfométrica

As relações interdimensionais de *Handroanthus heptaphyllus* e de *Platanus x acerifolia* estão apresentadas na Tabela 7. Observa-se que as espécies apresentaram características semelhantes na expressão dos índices, apesar das condições de crescimento distintas entre locais e características específicas das espécies, o que demonstra que essas possuem comportamento semelhante nas diferentes tipologias onde estão inseridas.

Tabela 7: Estatísticas descritivas para índices morfométricos e variáveis mensuradas em árvores de *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* plantadas na área urbana de Irati-PR.

Variáveis	<i>Handroanthus heptaphyllus</i>				<i>Platanus x acerifolia</i>			
	MIN	MÉD	MÁX	CV%	MIN	MÉD	MÁX	CV%
DAP (cm)	26	45	67	23,71	18	34	51	28,09
Altura total (m)	9,50	16,53	28,80	25,68	7,80	12,96	16,70	16,49
Altura bifurcação (m)	0,60	2,66	7,40	54,56	1,80	3,35	5,60	23,56
Diâmetro de copa (m)	8,85	12,90	19,67	18,81	6,99	10,76	14,88	18,69
Comprimento de copa (m)	7,00	13,33	24,70	29,92	6,30	10,37	14,00	18,54
Proporção de Copa (%)	64,18	79,94	91,95	7,81	64,29	79,89	87,78	6,87
Grau de esbeltez	24,98	37,13	53,22	20,01	29,59	40,49	54,98	20,37
Índice de abrangência	0,57	0,80	1,10	17,62	0,68	0,83	1,04	10,71
Índice de saliência	19,28	29,13	36,53	15,78	23,02	33,14	41,53	13,99
Formal de Copa	0,66	1,02	1,71	23,90	0,80	1,04	1,27	10,10

Em que: MÍN = mínimo; MED = médio; MÁX = máximo; CV% = coeficiente de variação.

Observa-se alta variabilidade de altura de bifurcação principalmente em *Handroanthus heptaphyllus*, o que permite afirmar que essas árvores não são originárias de mudas com padrão ideal para arborização urbana, sendo o aconselhável no mínimo de 1,80 m de altura de bifurcação.

A Proporção de Copa de *Handroanthus heptaphyllus* variou 43,27%, enquanto que para *Platanus x acerifolia* variou 36,54%, demonstrando que entre as espécies houve distinções na variabilidade de ocupação do espaço, mas com maior variabilidade para *H. heptaphyllus* conforme indicado pelo coeficiente de variação. Esse é um padrão que se repete para os demais índices, observando-se uma variação de 113,05% para o Grau de Esbeltez para *H. heptaphyllus* e 85,80% para *P. acerifolia*, de 159,09% para o Formal de Copa para *H. heptaphyllus* e 58,70% para *P. acerifolia*.

Bobrowski e Biondi (2017), em estudo sobre seis espécies da arborização urbana de Curitiba, Paraná, afirmaram que árvores de grande porte podem apresentar menor Proporção de Copa quando sofrem intervenções com podas de elevação. Para esse índice os autores apresentaram valores mínimos em torno de 23,0% e 27,0% para *Parapiptadenia rigida* (Benth.) Brenan e *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze, respectivamente.

De acordo com Roman et al. (2009), quanto maior a porcentagem de copa, maior poderá ser a capacidade produtiva da árvore, sendo esse um indicador de vitalidade. A Proporção de Copa para ambas as espécies estudadas foi maior que 64%, demonstrando que as árvores possuem copa de tamanho expressivo e boa vitalidade. Assim, árvores que passam por podas de elevação excessiva, tais quais comentadas no parágrafo anterior, podem perder a vitalidade e demonstrar desequilíbrio alométrico, pois a relação altura de copa e altura total da árvore fica descaracterizada. Segundo Bobrowski (2015), maiores proporções de copa estão, também, atreladas a melhor oferta dos benefícios almejados, sendo que a quantidade de massa verde existente na copa das árvores, interferem diretamente na regulação microclimática.

Por meio do Índice de Saliência de *H. heptaphyllus* foi possível constatar que, em média, as copas são 29 vezes mais largas que o tronco, já para *P. acerifolia* a relação média foi da copa 33 vezes maior. Isso indica a importância de considerar as projeções de copas para medições em áreas urbanas, uma vez que o espaço acima da bifurcação ocupado por elas é expressivo, além da possível interferência que essas podem gerar com as infraestruturas públicas. Logo, uma das maneiras de evitar futuros problemas como conflitos entre árvores e estruturas construídas, é realizar o planejamento da arborização urbana tomando como base o tamanho da copa atual e ao longo do tempo.

O índice Grau de Esbeltez médio para *H. heptaphyllus* e *P. acerifolia* foi, respectivamente, de 37,13 e 40,49. Segundo Bobrowski (2015), por meio do conhecimento dessa relação de altura total e DAP é possível realizar orientações sobre o risco de queda de

árvores, entretanto devem-se levar em consideração o modelo estrutural da árvore.

Dessa mesma forma, o Índice de abrangência variou em 92,98% e 52,94% e o Índice de Saliência em 89,47% e 80,41,0% para *H. heptaphyllus* e *P. acerifolia*, respectivamente. Bobrowski e Biondi (2017), afirmaram que o Índice de Abrangência não deve ser superior a 1,5 devido ao desequilíbrio que reflete uma copa mais ampla do que a árvore pode suportar. Bobrowski (2015) afirmou que por meio dessa relação (diâmetro de copa/altura total) é possível planejar o momento em que as copas poderão se entrelaçar, necessitando de manejo com podas para diminuição de riscos.

Em referência às estimativas realizadas para as medidas das árvores por meio das relações dos índices morfométricos Grau de Esbeltez, Índice de Saliência e Formal de Copa, para as comparações entre altura total (h) e diâmetro de copa (D_{cp}) real (mensuradas a campo) e estimadas não houve diferença significativa para a altura total mensurada e estimada com utilização do GE, da mesma forma para o diâmetro de copa mensurado e o estimado com o IS, com a variável independente o DAP (Tabela 8).

Tabela 8: Teste t para comparações entre altura total média (m) mensurada e estimada, diâmetro de copa médio (m) mensurado e estimado e comprimento (ou altura) de copa média (m) mensurada e estimada para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* plantadas na floresta urbana de Irati-PR.

		Altura total		Diâmetro de copa		Altura de copa	
		Mensurado	Estimado	Mensurado	Estimado	Mensurado	Estimado
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>		16,53	16,85	12,90	13,22	13,33	13,13
		t_{calc}	-0,2933	t_{calc}	-0,4386	t_{calc}	0,2351
		p -valor	0,7703	p -valor	0,6626	p -valor	0,8151
<i>Platanus acerifolia</i>	x	Mensurado	Estimado	Mensurado	Estimado	Mensurado	Estimado
		12,96	13,58	10,76	11,11	10,37	11,21
		t_{calc}	-0,7769	t_{calc}	-0,5283	t_{calc}	-1,6287
	p -valor	0,4404	p -valor	0,5993	p -valor	0,1088	

Quando se trata de estimativas de altura de copa (h_{cp}) com utilização da relação alométrica Formal de Copa, em função do diâmetro de copa, para as espécies *P. acerifolia* e *H. heptaphyllus* também não houve diferença estatística entre os valores mensurados (reais) e estimados. Sendo assim, o índice formal de copa médio permite a estimativa de altura de copa, por meio da medição apenas do diâmetro de copa, o pode facilitar coletas a campo.

Sanquetta et al. (2011), afirmaram que em espécies individuais existe uma forte correlação entre a área de projeção de copa horizontal, variável diretamente dependente do

diâmetro de copa, e o DAP. Essa afirmativa corrobora com as estimativas do presente estudo, pois o D_{cp} foi adequadamente estimado por meio do DAP, sendo que as duas espécies estão plantadas de forma individual, ou seja, com distribuição de copa livre de concorrência.

As estimativas foram todas superestimadas em relação aos valores obtidos por meio da mensuração em *Platanus x acerifolia* e *Handroanthus heptaphyllus*, com exceção da altura de copa, sendo explicado pela utilização da média dos valores dos índices, que elevaram as estimativas das variáveis de interesse.

Quanto à classificação das árvores em relação ao Formal de Copa, foi possível observar que para *Handroanthus heptaphyllus* a maior parte dos indivíduos foram classificados com conformação de copa do tipo elíptica vertical, seguidos de 33,0% elíptica horizontal e 30% arredondada. A maioria das árvores (77,0%) de *Platanus x acerifolia* pertence à classe 2, com copa arredondada, ou seja, diâmetro e altura de copa de dimensões semelhantes, seguindo de 20,0% elíptica horizontal e apenas 3,0% elíptica vertical (Figura 15).

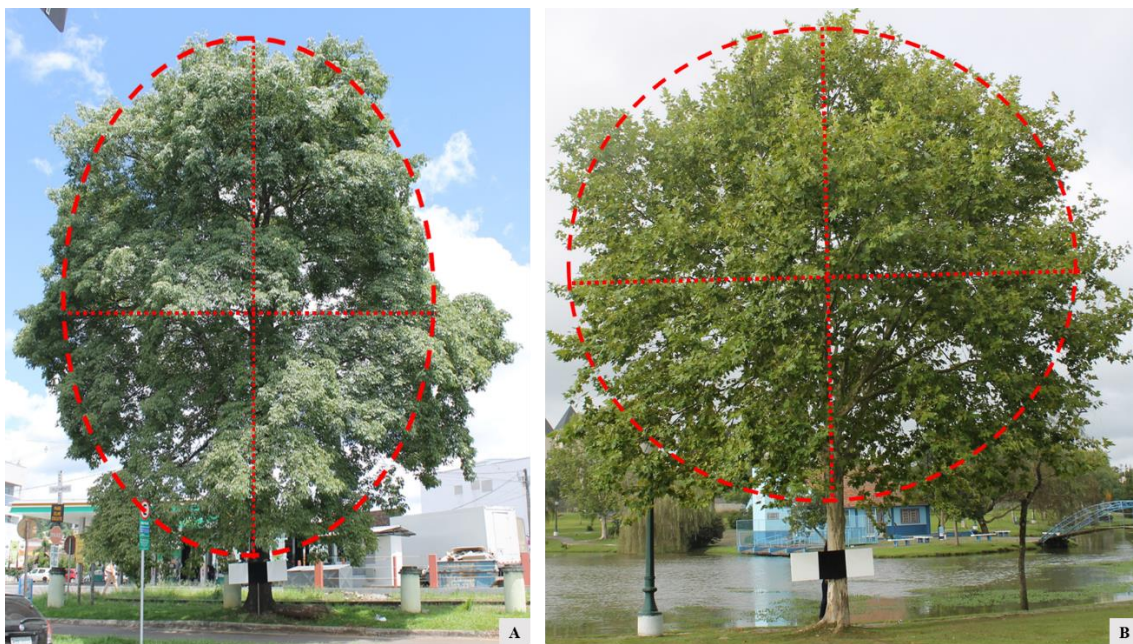


Figura 15: Conformação de copa preponderante para a maioria dos indivíduos de *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR.

O resultado aqui apresentado é divergente do que consta na literatura quanto ao *Handroanthus heptaphyllus* e adequado para *Platanus x acerifolia*, pois segundo Saueressig (2014) e Lorenzi et al. (2003), essas duas espécies possuem copa estruturalmente globosa. Entretanto, quando se leva em consideração a conformidade média da copa dos indivíduos do presente estudo, ambos se enquadram em globosa/hemisférica ou arredondada, nomenclatura

que pode variar conforme o autor, a qual possui diâmetro de copa com dimensão semelhante à altura de copa, por fim pode-se afirmar que a média não explica a real forma da copa de *H. heptaphyllus*, mas é adequada para *P. acerifolia*.

5.5. Modelagem da projeção de copa de árvores urbanas

O coeficiente de Correlação de Pearson (r) entre o diâmetro de copa e o DAP foi de 0,706 para *Handroanthus heptaphyllus* e 0,886 para *Platanus x acerifolia*, respectivamente, sendo essas boas correlações para os dados utilizados.

North (2013), ao estudar o diâmetro de copa de árvores urbanas demonstrou que existe uma alta correlação com o DAP (0,78-0,87) em diferentes espécies do gênero *Acer* plantadas em áreas urbanizadas. Entretanto, a correlação pode ser menor conforme a maior variação do diâmetro de copa e em função da espécie. O autor afirmou que é de se esperar tal variação entre correlações nas árvores presentes nas florestas urbanas e, principalmente, as variações no diâmetro de copa, pois os indivíduos estão em constantes conflitos com diversas infraestruturas além de, muitas vezes, terem sofrido práticas de manejo inadequadas.

A relação alométrica entre D_{cp} e DAP em *Handroanthus heptaphyllus* mostrou que, no geral, as árvores tendem a uma relação linear crescente, entretanto a árvore de maior DAP não possui o maior diâmetro de copa (D_{cp}) e vice-versa. Quando a atenção é voltada para *Platanus x acerifolia*, a relação crescente entre variáveis fica ainda mais evidente, ou seja, na medida que o DAP aumenta, o D_{cp} também aumenta, indicando que as maiores árvores em DAP possuem as copas mais largas (Figura 18).

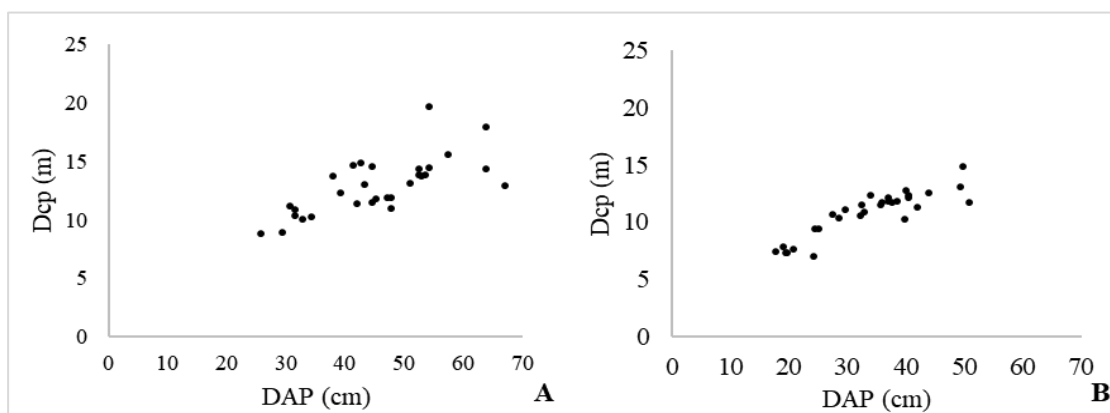


Figura 16: Relações alométricas entre diâmetro de copa (D_{cp}) e DAP em *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na área urbana de Irati-PR.

De acordo com Sanquetta et al. (2011) e North (2013), em condições de agrupamentos florestais, a menor correlação ente D_{cp} e DAP está relacionada com as características das espécies e principalmente com a capacidade de competição, devido a maior densidade de árvores por unidade de área. Para árvores presentes em áreas urbanas, em pleno crescimento, livre de concorrência, ao contrário das espécies em florestas nativas que sofrem competição, nota-se que a menor correlação não se trata apenas das características das espécies, mas que também varia em função das interferências de manejo com poda e das prováveis variações espaciais da qualidade do solo.

Segundo Peper et al. (2001a), essa correlação também pode sofrer alteração em função da forma com que são manejadas, como práticas de poda e outros manejos culturais. Esses autores consideraram uma forte correlação ao encontrar $r = 0,80$ em 12 espécies estudadas nas ruas de Modesto, Califórnia, enquanto que encontraram uma correlação maior de 0,90 para outras seis espécies em Santa Mônica, Califórnia.

Dentre os modelos testados para estimativa do diâmetro de copa, a equação (20) apresentou o melhor desempenho, para ambas as espécies avaliadas, com melhor coeficiente de determinação (R^2_{adj}) e menor erro padrão de estimativa (S_{yx}) (Tabela 9). As equações obtidas para *Handroanthus heptaphyllus* (32) e *Platanus x acerifolia* (33) foram:

$$\ln D_{cp} = 0,4799 \cdot \ln DAP + 0,2606 \cdot \ln h \quad (32)$$

$$\ln D_{cp} = 0,4140 \cdot \ln DAP + 0,3615 \cdot \ln h \quad (33)$$

Tabela 9: Parâmetros estimados para os modelos ajustados, com respectivos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro padrão de estimativa (Syx %), para estimar o diâmetro de copa em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Espécie	Parâmetros estimados					Estatísticas	
	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	Syx(%)
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	16	5,6721	0,1593			0,4807	13,55
	17	0,3893	0,5682			0,4916	13,41
	18	-	0,4225	-0,0029		0,9481	13,14
	19	9,4489	-0,2587	0,0127	-0,0001	0,4784	13,58
	20	-	0,4799	0,2606		0,5745	12,27
	21	0,3249	0,5816			0,4910	13,42
<i>Platanus x acerifolia</i>	16	4,4122	0,1891			0,7779	7,23
	17	0,2320	0,6121			0,7987	8,39
	18	-	0,4781	-0,0044		0,9589	7,58
	19	-	0,4559	-0,0031	0,00001	0,9574	7,70
	20	-	0,4140	0,3615		0,8653	6,86
	21	0,1407	0,6326			0,7969	7,37

Modelos destacados em negrito apresentaram os melhores ajustes.

Apesar do modelo 20 ter sido o melhor em termos estatísticos, por apresentar menor erro, os coeficientes β_0 não foram significativos ($p > 0,05$) nos modelos ajustados em nenhuma das duas espécies, portanto para adequação desses modelos fez-se necessário reajustar, com as constantes iguais a zero.

O modelo com as melhores estatísticas é uma adaptação do tradicional modelo de estimativa de volume de Schumacher e Hall (1933). A justificativa para isso é que, segundo Troxel et al. (2013), bons ajustes, com baixo erro e alto coeficiente de determinação nas estimativas de copa podem ser alcançados com modelos não lineares em diferentes espécies de árvores plantadas na área urbana. Além disso, de acordo com Kin e Lee (2016), modelos que englobam as variáveis DAP e h são mais acurados e precisos, apesar da variável altura exigir pessoas com bom treinamento para coleta a campo.

De acordo com North (2013), o modelo 18 ($D_{cp} = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP + \beta_2 \cdot DAP^2$) foi o único, dentre os quatro testados pelo autor, com erros aceitáveis e coeficientes significativos, com R^2_{adj} máximo de 0,85 em espécies do gênero *Acer*, plantados na área urbana de Minnesota, EUA. Ao se tratar das espécies avaliadas no presente estudo (*Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*), esse não foi o modelo mais qualificado para estimar o D_{cp} , entretanto, foi o melhor na estimativa de D_{cp} em função apenas da variável DAP (Equação 18). Assim sendo, quando a disponibilidade de variáveis mensuradas a campo for reduzida, esse pode ser um modelo adequado para realizar tais estimativas, pois o DAP é uma medida prática de ser tomada a campo.

Nesse mesmo sentido, Machado e Figueiredo Filho (2014) afirmaram que o DAP é a medida mais prática a ser tomada a campo, pois essa variável permite gerar outras variáveis de interesse como área transversal, volume, crescimento e assim, definir os padrões das árvores. Segundo esses autores, a medição da altura em indivíduos arbóreos demanda tempo a campo e embute erros de medições pela ausência de ápice das árvores que não possuem um eixo monopodial, podendo causar subjetividade.

A distribuição gráfica dos resíduos para as estimativas de diâmetro de copa em *H. heptaphyllus* apresentou tendência adequada, ou seja, as equações ajustadas não apresentaram sub ou superestimativas, sendo adequadas para estimar o diâmetro de copa para os diferentes diâmetros. Desta maneira, dentre a distribuição de diâmetros, as condições de plantio e do meio existentes nesse estudo, pode-se afirmar que os modelos utilizados na literatura são aceitáveis para estimar o diâmetro de copa dessa espécie (Figura 19).

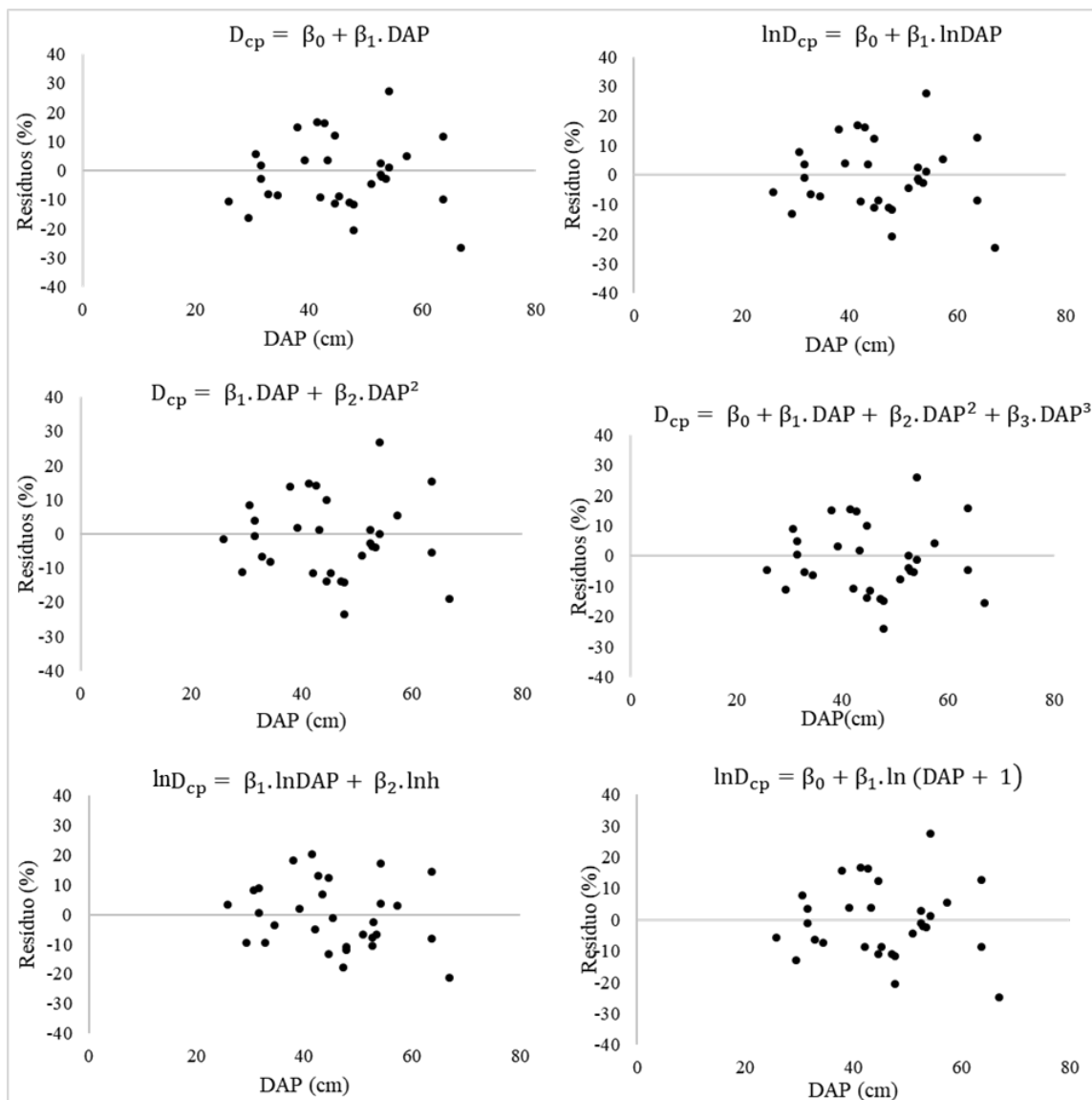


Figura 17: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados em *Handroanthus heptaphyllus*.

A distribuição gráfica dos resíduos corrobora com os demais procedimentos para avaliação de modelos (erro padrão e coeficiente de determinação), em que o modelo de Schumacher-Hall (1933) modificado foi o mais adequado, com menor dispersão dos resíduos e superestimando menos do que os demais modelos. Todavia, quanto a subestimativas, a distribuição dos resíduos foi semelhante para todos os modelos, ou seja, com pontos dispersos na subestimativa proporcionais em todos os modelos.

Por outro lado, a distribuição dos resíduos em *Platanus x acerifolia* ao longo do eixo demonstrou que os modelos 16, 17, 18, 19 e 21 subestimaram valores entre 20-40 cm de DAP.

A melhor distribuição dos resíduos foi apresentada pelo gráfico referente ao modelo 20, adaptado de Schumacher-Hall (1933).

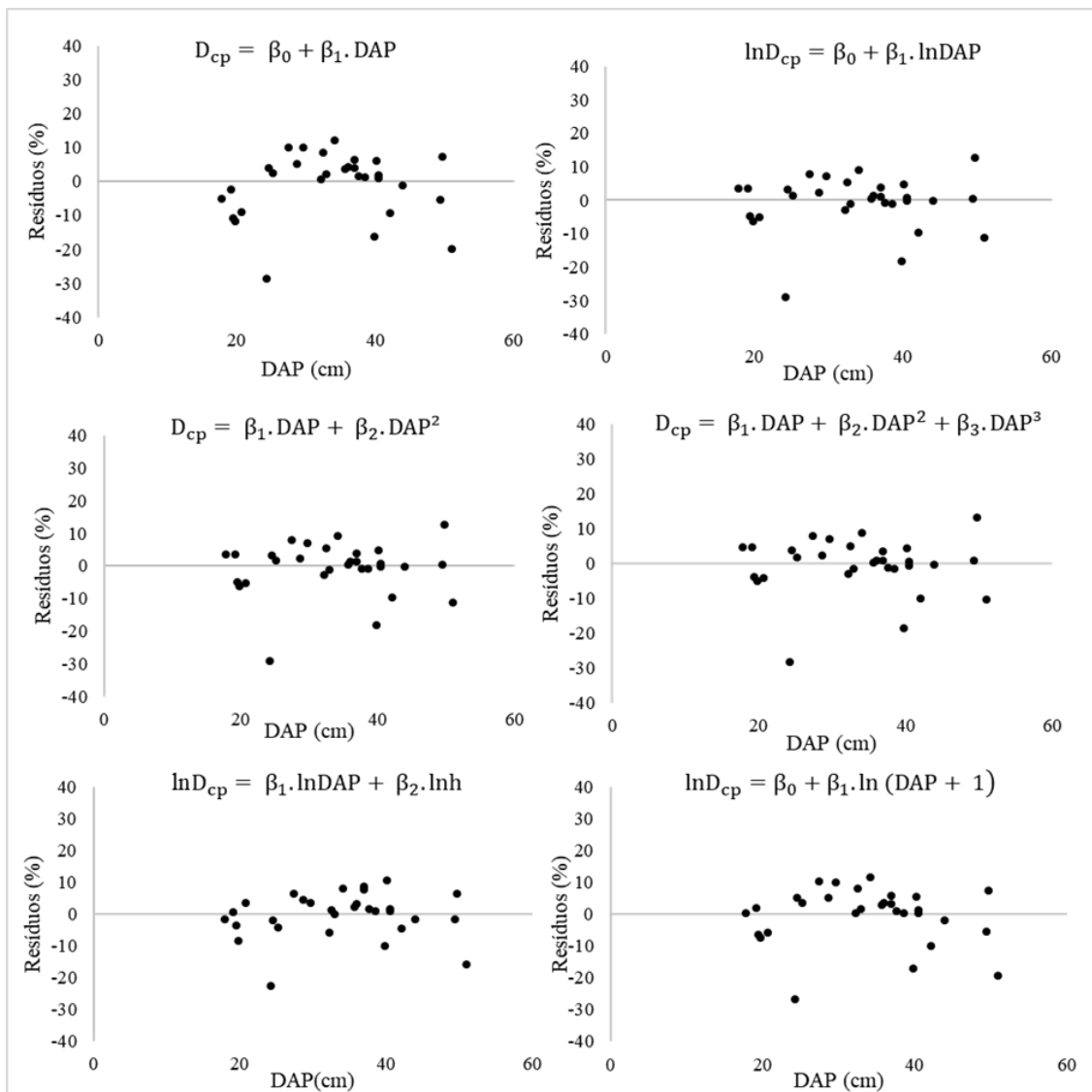


Figura 18: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados em *Platanus x acerifolia*.

O método de seleção de variáveis, *stepwise*, foi utilizado para verificar se havia um conjunto de variáveis, linearizadas ou fracionadas, que pudessem trazer melhor qualidade de ajuste do que os modelos testados. Assim, o subconjunto de variáveis independentes que melhor estimou a variável dependente (D_{cp}) por meio da regressão múltipla *stepwise* foi o mesmo subconjunto das variáveis utilizadas no melhor modelo (20), definido pelas medidas de DAP e h , porém em equações distintas em cada uma das espécies (Tabela 10).

Tabela 10: Equações resultantes da estimativa de diâmetro de copa (D_{cp}) por meio da regressão *stepwise* e estatísticas coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro padrão da estimativa (S_{yx} (%)) em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Espécie	Equação ajustada	R^2_{adj}	S_{yx} (%)
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	$D_{cp} = \frac{1}{(0,0583 + 1,5723 \cdot \frac{1}{DAP} - 0,0009 \cdot h)}$	0,5876	12,08
<i>Platanus x acerifolia</i>	$\ln D_{cp} = 2,3812 - 12,9978 \cdot \ln \frac{1}{DAP} + 0,0308 \cdot \ln h$	0,8752	6,60

A equação ajustada por meio das variáveis selecionadas com *stepwise* e com R^2_{adj} e erros pouco melhores do que no modelo (20). O presente estudo confirma o proposto por Troxel et al. (2013), que sugeriu modelos não lineares para árvores plantadas na floresta urbana. Nesse caso, o modelo não linear de Schumacher (modificado) foi eficiente para estimativa de diâmetro de copa.

Peper et al. (2001a) encontraram boas estimativas de D_{cp} para *Platanus x acerifolia*, com $R^2 = 0,81$ para indivíduos com DAP variando de 38 a 48 cm e D_{cp} de aproximadamente 12 m, plantados na área urbana de Modesto, Califórnia, EUA. Todavia, o presente estudo teve maior variabilidade dessas variáveis mensuradas a campo (DAP = 25,8 a 66,8 cm e D_{cp} = 8,8 a 19,7 m), e ainda assim, foi possível atingir uma estimativa com coeficiente de determinação adequado e erro de 6,6% para essa espécie.

Assim, observa-se que existe uma grande variabilidade nas estimativas de diâmetro de copa de árvores urbanas, com inúmeros fatores determinantes, dentre eles a espécie e o local em que estão inseridas. Para McPherson et al. (2016), deve-se levar em consideração que a mesma espécie, sob condições de crescimento e processos de gestão e manutenção distintos pode apresentar característica diferente. Portanto, é necessário que cada espécie tenha sua equação ajustada para a região de interesse, sendo necessário estudos específicos.

Por meio da distribuição dos resíduos pode-se afirmar que as equações ajustadas por *stepwise* apresentaram bom ajuste para ambas as espécies *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia*, assim não há sub ou superestimativas acentuadas ao longo dos diferentes DAP (Figura 21).

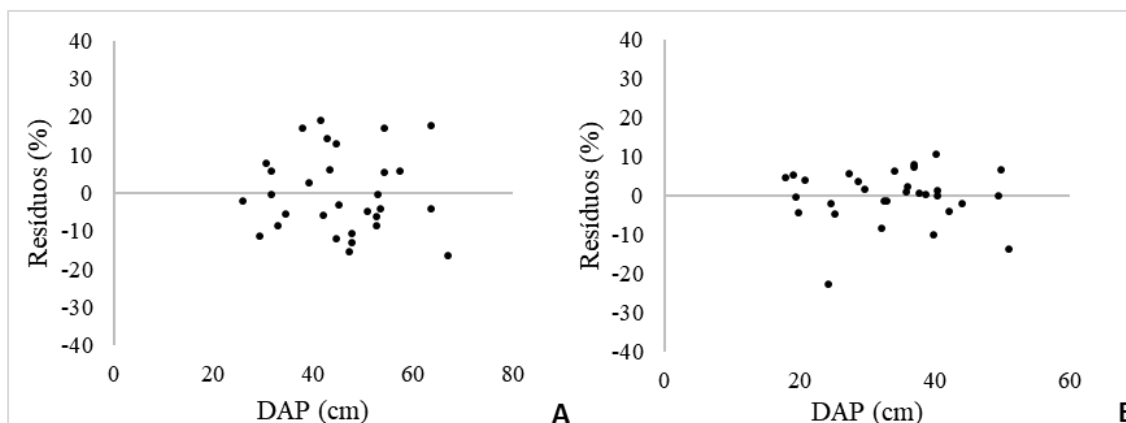


Figura 19: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados por meio das variáveis selecionadas com *stepwise* em *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B).

Os mesmos modelos utilizados para estimar diâmetro de copa foram ajustados para estimar a área de copa. Apesar de se esperar estimativas similares, por serem duas variáveis correlacionadas, as estatísticas de análise dos modelos ajustados não foram tão eficientes quanto as anteriores (Tabela 11).

Tabela 11: Parâmetros estimados para os modelos ajustados, com respectivos coeficientes de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro padrão de estimativa (S_{yx} %), para estimar área de copa em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Espécie	Estimativa dos Parâmetros						
	Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	R^2_{adj}	$S_{yx}(\%)$
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	16	-	2,9923			0,8936	29,73
	17	-	1,2776			0,4213	30,69
	18	-108,4459	7,6944	-0,0486		0,4136	29,81
	19	250,11	-17,4284	0,5118	-0,004	0,4066	30,09
	20	-	0,9031	0,5110		0,5358	26,52
	21	-	1,2700			0,4246	29,53
<i>Platanus x acerifolia</i>	16	-	2,8192			0,9426	16,25
	17	-	1,2879			0,7515	17,28
	18	-69,1786	6,9721	-0,0584		0,8003	15,49
	19	-108,1278	10,7797	-0,1746	0,0011	0,7934	15,76
	20	-	0,8210	0,6380		0,8340	14,12
	21	-	1,2765			0,7619	16,91

Modelos destacados em negrito apresentaram os melhores ajustes.

Os ajustes em área de copa de *Platanus x acerifolia* foram melhores do que em *Handroanthus heptaphyllus*, mas ainda assim os erros das estimativas, praticamente, dobram em relação a diâmetro de copa estimado, mesmo que com coeficiente de determinação (R^2_{adj}) similares. Autores como Čermák et al. (2000), Brack (2002) e Rahman et al. (2018), realizaram estimativas de área de projeção de copa de árvores urbanas com finalidade de verificar os benefícios ofertados por essas, entretanto, nenhum dos autores compararam os métodos de estimativas com o diâmetro de copa mas como a informação desejável por esses autores não foi relacionada a ocupação e espaço e sim a benefícios, essas podem ser estimativas aceitas. Sugere-se a comparação das estimativas utilizando a variável de área de copa e o diâmetro de copa também para estudos relacionados a benefícios ambientais a fim de garantir a qualidade dos ajustes e definir a melhor variável dependente.

O modelo estipulado para estimar área de copa por meio da seleção das variáveis com *stepwise* em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* foi o mesmo, eficiente para ambas as espécies e com melhor ajuste do que os demais avaliados (Tabela 12), mas ainda assim, menos qualificados do que em diâmetro de copa e com maiores erros de estimativas.

Tabela 12: Equações resultantes da estimativa de diâmetro de copa (D_{cp}) por meio da regressão *stepwise* e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro médio ($S_{yx}\%$) em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Espécie	Equação ajustada	R^2_{adj}	$S_{yx}\%$
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	$\ln A_{cp} = (5,2128 - 35,2788 \cdot \ln \frac{1}{DAP} + 0,0273 \cdot \ln h)$	0,5411	26,37
<i>Platanus x acerifolia</i>	$\ln A_{cp} = (4,5208 - 25,9956 \cdot \ln \frac{1}{DAP} + 0,0615 \cdot \ln h)$	0,8526	13,31

Yoon et al. (2013) estudaram cinco espécies utilizadas na arborização de calçadas em Daegu, Coreia do Sul, e consideraram uma forte relação entre área de copa e DAP com $R^2=0,68$ em *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino e baixo $R^2 = 0,17$ em *Platanus orientalis*, porém o estudo utilizou apenas dez indivíduos por espécie.

Em contrapartida, Grabosky e Gilman (2004) obtiveram um bom ajuste ao estimar D_{cp} em função do DAP, com $R^2 = 0,901$, em 78 indivíduos de *Platanus occidentalis* distribuídos em diferentes tipologias da floresta urbana na região norte da Florida, Estados Unidos. Logo, têm-se dois fatores que podem influenciar nas estimativas, a variável de interesse (área ou diâmetro de copa) e o tamanho da amostragem, que ao aumentar o número de indivíduos pode representar melhor a espécie de interesse.

Pretzsch et al. (2015) realizaram estimativas de tamanho da copa de diferentes espécies de árvores distribuídas em nove metrópoles urbanas, por meio do raio de copa em função do DAP. Os autores afirmaram ser possível transformar essa variável (raio de copa) para área de projeção de copa com redução dos erros, por meio da média quadrática dos raios. Entretanto, para o presente estudo as estimativas de área de copa apresentaram maior erro do que aquelas realizadas para diâmetro, ainda que essas variáveis são correlacionadas, o diâmetro de copa é uma variável mais adequada para ajuste de modelos de predição do tamanho da copa de árvores urbanas.

5.6. Modelagem da Altura total

Os melhores resultados para os modelos que estimam o diâmetro ou a área de projeção de copa demonstraram que as melhores estimativas dessas variáveis dependem da altura total das árvores como variável explicativa. A altura total das árvores nem sempre é uma medida fácil de se obter a campo, portanto foram ajustados modelos para gerar estimativas dessa variável por meio do DAP (relação hipsométrica).

Os melhores ajustes da relação hipsométrica foram com coeficientes de determinação ajustados (R^2_{adj}) de 0,3552 e 0,5927, com erros (S_{yx}) de 20,62% e 10,52% para *Handroanthus heptaphyllus* e para *Platanus x acerifolia*, respectivamente (Tabela 13).

Tabela 13: Equações resultantes da estimativa de altura total (h) em função do DAP e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R²adj) e erro médio (Syx%) em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Espécie	Equação ajustada	R ² adj	Syx (%)
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	$h = 26,6042 - 430,737 \cdot \left(\frac{1}{DAP}\right)$	0,3552	20,62
	$\ln h = 3,4116 - 27,1934 \cdot \left(\frac{1}{DAP}\right)$	0,3470	20,75
	$\ln h = 0,3089 + 0,6516 \cdot \ln DAP$	0,3231	21,12
<i>Platanus x acerifolia</i>	$h = 18,1254 - 158,80 \cdot \left(\frac{1}{DAP}\right)$	0,5927	10,52
	$\ln h = 2,9885 - 13,5704 \cdot \left(\frac{1}{DAP}\right)$	0,5762	10,73
	$\ln h = 0,9663 + 0,4554 \cdot \ln DAP$	0,5324	11,27

Apesar da reduzida qualidade dos ajustes evidenciada pelo coeficiente de determinação e pelos erros demonstrados na Tabela 13, os valores podem ser considerados satisfatórios por se tratar de árvores em condições urbanas. Além do mais, por meio da ANOVA, o valor de F a 6,98 em *H. heptaphyllus* (p-valor = 3×10^{-4}) e 43,21 em *P. acerifolia* (p-valor = $4,0 \times 10^{-7}$), constatou-se que há regressão entre as variáveis. De acordo com Kohler et al. (2017), o coeficiente de determinação pode se apresentar baixo em árvores mais velhas, fazendo com que, independente do DAP, a altura não se altere muito em relação à média.

Peper et al. (2001a), ao avaliar árvores urbanas na cidade de Modesto, Califórnia, afirmaram que a altura total e o DAP estão fortemente correlacionados em 12 espécies avaliadas, dentre essas, *Platanus x acerifolia*, com um $R^2 = 0,72$. Esses autores afirmaram que o DAP está melhor correlacionado com a área de copa, do que com a altura total das árvores ou a altura de copa, isso porque essas últimas são variáveis altamente modificadas na área urbana. Graficamente, é possível analisar as tendências de maior dispersão dos resíduos, principalmente entre 40-60 cm de DAP para ambas as espécies (Figura 22).

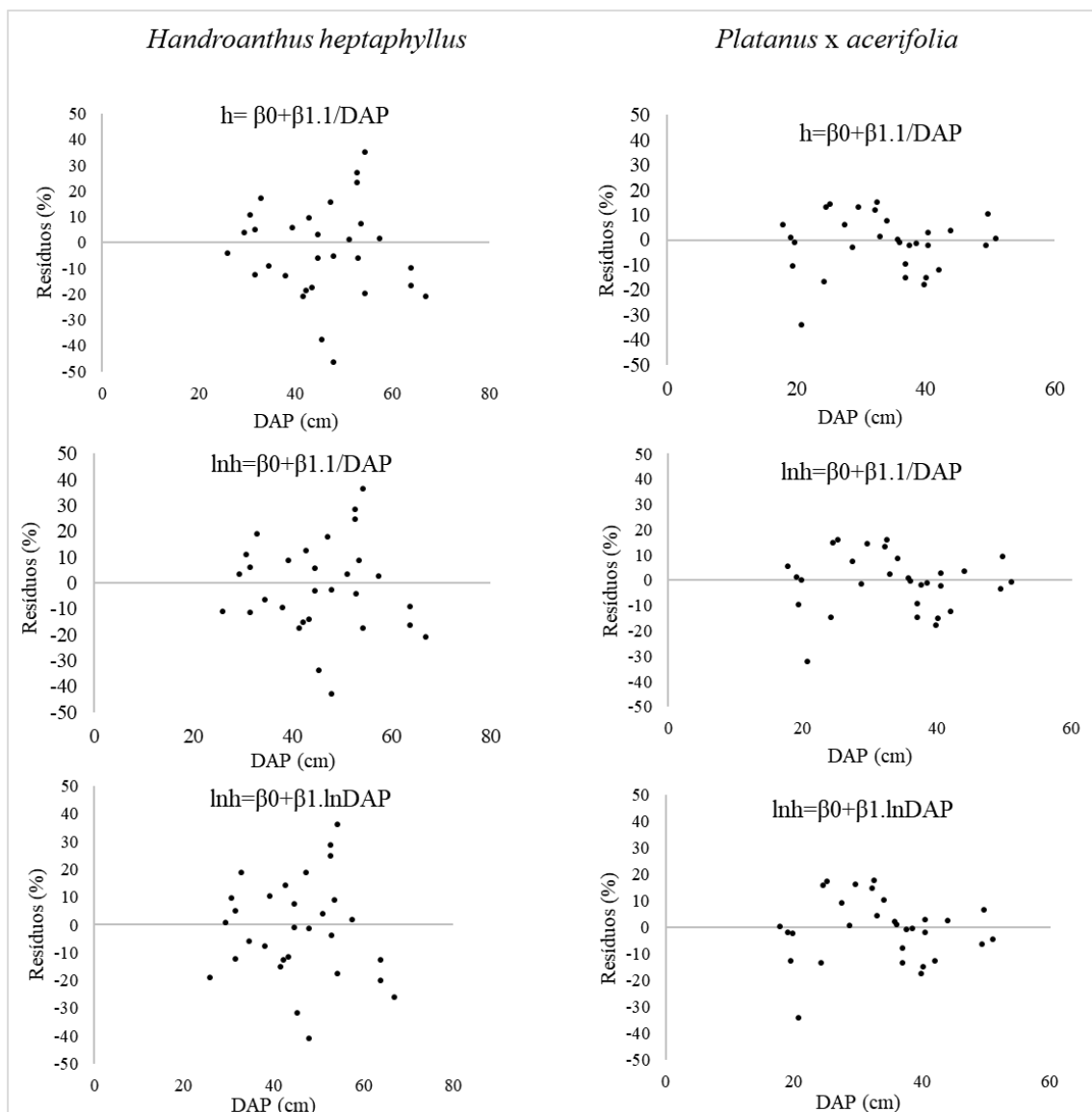


Figura 20: Distribuição dos resíduos em função dos diferentes DAP (diâmetro a altura do peito) para os modelos ajustados da relação hipsométrica em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* .

A qualidade dos ajustes também pode estar relacionada com as características das árvores urbanas que, apesar de estarem livre de concorrência, sofrem com as condições climáticas e demais questões típicas da área urbanizada. Além disso, estimativas de altura de árvores na área urbana não precisam da mesma exatidão que se almeja nas florestas plantadas, pois o volume comercial não é a variável de interesse, dessa forma as estimativas apresentadas podem ser aceitas como satisfatórias.

Mendonça et al. (2018), ao avaliarem a relação hipsométrica em plantios de *Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur, Bignoneacea nativa do Brasil, obtiveram bons ajustes e afirmaram novamente que o levantamento da altura de indivíduos arbóreos é uma medida de difícil obtenção, e por esse motivo se utiliza da ferramenta de regressão para determinação dessa variável por meio do DAP, entretanto esses mesmos autores afirmaram que a estimativa com a utilização de Redes Neurais Artificial pode ser ainda mais precisa pois o algoritmo possibilita melhor estimativa.

5.7. Modelagem do crescimento de árvores urbanas

A estimativa de diâmetro com casca foi utilizada para conhecer a representação dessa variável ao longo dos anos, tendo em vista que, as amostras de análise de tronco parcial geram informações do crescimento em diâmetro ao longo dos anos sem considerar a casca e as medidas a campo são do DAP com casca. A partir das equações ajustadas, se pode afirmar que o modelo linear foi efetivo para essa estimativa em ambas as espécies conforme apresentado na Tabela 14.

Tabela 14: Equações resultantes da estimativa de Diâmetro do tronco a Altura do Peito com casca (DAP_{cc}) em função do Diâmetro do tronco a Altura do Peito sem casca (DAP_{sc}) e as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{adj}) e erro médio ($S_{yx}\%$) em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	R^2_{adj}	$S_{yx} (\%)$	<i>Platanus x acerifolia</i>	R^2_{adj}	$S_{yx} (\%)$
$DAP_{cc} = 1,5330.DAP_{sc}$	0,9090	19,03	$DAP_{cc} = 1,0613.DAP_{sc}$	0,937	17,88

O modelo biológico de Chapman-Richards foi ajustado para estimar o crescimento em diâmetro ao longo dos anos para as duas espécies (Tabela 15), com resultados satisfatórios para o coeficiente de determinação. As informações geradas por esses modelos são importantes para a estimativa de diâmetro ao longo do tempo, sendo essa a variável de interesse para estimar o diâmetro de projeção de copa das árvores e auxiliar no processo de planejamento da ocupação do espaço, principalmente nas calçadas.

Tabela 15: Resultados do ajuste do modelo de Chapman-Richards para estimar diâmetro (DAP_{cc}) ao longo das diferentes idades para *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Espécie	Modelo ajustado	R ² _{adj}	S _{yx} (%)	F calculado
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	$DAP_{cc} = 70,1239 \cdot [(1 - \exp(-0,05268 \cdot I))]^{1,8446}$	0,8509	37,96	1689,76
<i>Platanus x acerifolia</i>	$DAP_{cc} = 72,6748 \cdot [(1 - \exp(-0,04279 \cdot I))]^{2,4218}$	0,8790	36,72	2802,87

Em que: DAP_{cc} = diâmetro a altura do peito com casca (cm); I= idade (anos); R²_{adj} coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} (%) = erro padrão da estimativa.

Canetti et al. (2017) ao avaliarem o crescimento de *Araucaria angustifolia* presentes em diferentes tipologias (árvores de calçadas, jardins perto de casas, praças e bairro residências e indústrias) da floresta urbana de Araucária-PR, obteve um R² maior que 0,96 para todos os ambientes avaliados, com erros menores do que os encontrados no presente estudo. Os autores afirmaram que árvores urbanas tendem a apresentar baixa correlação entre as séries cronológicas de crescimento, pois os locais possuem alta heterogeneidade fazendo com que exista grande variação nas taxas de crescimento, dentro disso sugerem a estratificação da área de estudo conforme o grau de urbanização.

Os gráficos de distribuição dos resíduos para as estimativas do DAP_{cc} demonstraram que o modelo de crescimento de Chapman-Richards não conseguiu estimar bem, com superestimativas nas menores idades, justificando assim o alto valor do erro padrão da estimativa para ambas espécies, sendo que em árvores mais velhas, houve melhor distribuição (Figura 23). De acordo com Boukili et al. (2017), pode ocorrer grande variabilidade das estimativas de crescimento das árvores conforme a espécie, a interação entre essas e o tamanho inicial da árvore. Portanto, as maiores taxas de resíduos nas árvores mais jovens podem estar atreladas a essas condições e também devido à alta variabilidade das taxas de crescimento nessas idades. Além disso, no presente estudo trata-se de árvores plantadas em áreas urbanas que sofrem grandes influências do meio externo e essas podem sofrer ainda mais quando ainda estão em estágios de crescimento e adaptação ao meio.

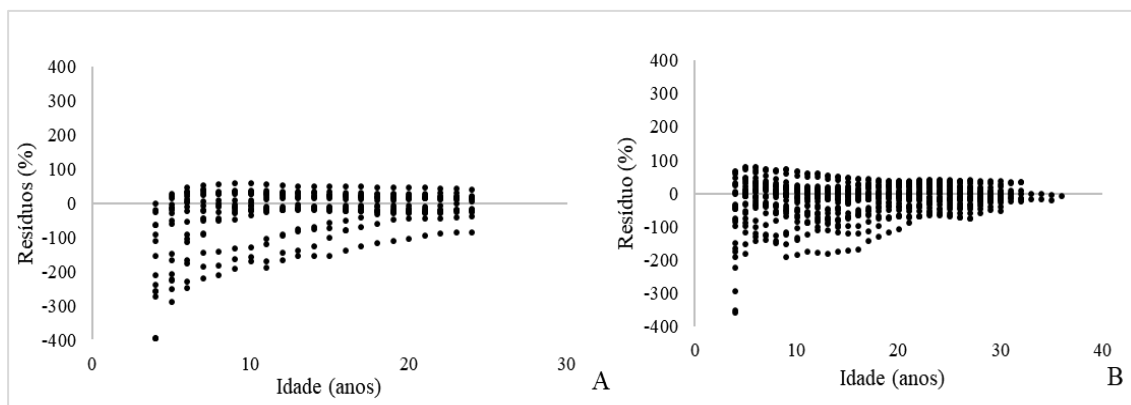


Figura 21: Distribuição gráfica dos resíduos ao longo das idades para o ajuste do modelo de crescimento de Chapman-Richards em *Handroanthus heptaphyllus* (A) e *Platanus x acerifolia* (B) presentes na floresta urbana de Irati-PR.

Quigley (2004) demonstrou que o padrão de crescimento de árvores ao longo da idade, considerando a mesma espécie, nem sempre é constante, apesar de fortes correlações das variáveis dimensionais. Por outro lado, segundo Troxel et al. (2013), as estimativas em função da idade podem ser significativamente influenciadas pelas características do local (permeabilidade, sombreamento, rua), entre outras variáveis características de áreas urbanas, e por isso sugeriu que a qualidade do local seja considerada como uma das variáveis de entrada no modelo, a qual pode ser mensurada, por exemplo, por meio da análise de vigor ou área foliar.

De acordo com Purves et al. (2007), a forma com que as árvores crescem em questão de espaço ocupado pela copa é uma informação decisiva para compreensão da dinâmica da floresta, permitindo gerar informações do processo de gestão. Assim, é por meio da modelagem do crescimento das variáveis de interesse nas diferentes idades que se consegue prever as características das árvores ao longo do tempo e planejar conforme a estrutura da mesma, no tempo (idade) de interesse.

As estimativas de tamanho de copa em função da idade ou do tempo são eficazes e podem ser mensuradas por meio de análise temporária e análise parcial do tronco, sem a necessidade de acompanhamento ao longo dos anos, que muitas vezes não é possível. Métodos com amostras destrutivas, tanto de tronco, como de galhos, também poderiam gerar informações mais precisas, entretanto o objetivo é compreender o crescimento dos indivíduos sem a necessidade de intervir em árvores que estão em pleno desenvolvimento e cumprindo com suas funções ecológicas na floresta urbana, contribuindo com a oferta de serviços ecossistêmicos diversos.

6. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem afirmar que dois raios de copa, desde que tomados nas posições cardeais Norte-Sul, Norte-Oeste, Leste-Oeste ou Sul-Leste são suficientes para estimar a área de projeção de copa horizontal em *Handroanthus heptaphyllus* e *Platanus x acerifolia* plantadas nas árvores urbanas.

A equação da figura geométrica que melhor se adequa à área de projeção de copa vertical em ambas as espécies estudadas é a do triângulo. Assim, a equação do cone, figura com equivalência ao triângulo, pode ser eficiente para estimar volume hipotético de copa.

A conformação da copa das árvores de *Handroanthus heptaphyllus* é do tipo elíptica vertical, enquanto que para *Platanus x acerifolia* é do tipo arredondada. A proporção de copa para ambas as espécies, nas condições em que crescem, se apresenta satisfatória para a promoção de benefícios ambientais e estéticos.

O diâmetro à altura do peito (DAP) é uma medida fácil de ser mensurada a campo e que permite a estimativa diâmetro de copa de forma eficiente. A altura total das árvores também pode ser estimada e inserida em modelos de estimativa de diâmetro de copa.

O diâmetro de copa se demonstrou melhor para realizar estimativas de dimensões da copa das árvores urbanas do que a área de projeção de copa. Ainda que essa medida esteja relacionada ao DAP, a transformação dos dados para área fez com que as estimativas fossem desfavoráveis.

O modelo biológico de Chapman-Richards foi eficiente para analisar a dinâmica de crescimento de ambas as espécies, principalmente em idades mais avançadas, as quais causam maiores interferências com infraestruturas públicas construídas devido ao maior porte das árvores.

7. REFERÊNCIAS

- AHERN, J. Urban landscape sustainability and resilience: the promise and challenges of integrating ecology with urban planning and design. **Landscape Ecology**, v.28, n.6, p.1203-1212, 2012.
- ALMEIDA, D. N.; RONDON NETO, R. M. Análise da arborização urbana de duas cidades da região norte do estado de Mato Grosso. **Árvore**, v.34, n.5, p.899-906, 2010.
- ANGULURI, R; NARAYANAN, P. Role of green space in urban planning: Outlook towards smart cities. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.25, p.58-65, 2017.
- BACKES, P.; IRGANG, B. **Mata Atlântica: as árvores e a paisagem**. Porto Alegre: Paisagem do Sul, 2004. 396p.
- BARBEDO, A. S.; BIANCHI, C. G.; KELLER, L. R.; ORTEGA, M. G.; ORTEGA, S. E. H. Manual técnico de arborização urbana. **Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente**, 2005. 45p.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; GSPALTL, M.; FORRESTER, D. I. Light absorption and use efficiency in forests: why patterns differ for trees and stands. **Forest Ecology and Management**, v.288, p.5-13, 2013.
- BIONDI, D. **Floresta Urbana**. Curitiba: O Autor, 2015. 202p.
- BIONDI, D.; ALTHAUS, M. **Árvores de rua de Curitiba: cultivo e manejo**. Curitiba: FUPEF, 2005. 180p.
- BOBROWSKI, R. A floresta urbana e a arborização de ruas. In: BIONDI, D. **Floresta urbana**. Curitiba: O Autor, 2015. 81-107 p.
- BOBROWSKI, R. **Estrutura e dinâmica da arborização de ruas de Curitiba, Paraná, no período 1984 - 2010**. 144 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- BOBROWSKI, R. **Gestão da arborização de ruas: ferramentas para o planejamento técnico e participativo**. 178 f. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BOBROWSKI, R.; BIONDI, D. Morfometria de espécies florestais plantadas nas calçadas. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v.12, n.1, p.1-16, 2017.
- 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**, Santa Maria, v.23, n.3, p.281-289, 2013.
- BOUKILI, V. K.; BEBBER, D. P.; MORTIMER, T.; VENICX, G.; LEFCOURT, D.; CHANDLER, M.; EISENBERG, C. Assessing the performance of urban forest carbon

sequestration models using direct measurements of tree growth. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.24, p.212-221, 2017.

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

BRACK, C. L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. **Environmental pollution**, v.116, p.S195-S200, 2002.

BRACK, C. L. Updating urban forest inventories: An example of the DISMUT model. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.5, n.4, p.189-194, 2006.

BUSH, S. E.; PATAKI, D. E.; HULTINE, K. R.; WEST, A. G.; SPERRY, J. S.; EHLERINGER, J. R. Wood anatomy constrains stomatal responses to atmospheric vapor pressure deficit in irrigated, urban trees. **Oecologia**, v.156, n.1, p.13-20, 2008.

CALFAPIETRA, C.; PEÑUELAS, J.; NIINEMETS, Ü. Urban plant physiology: adaptation-mitigation strategies under permanent stress. **Trends in Plant Science**, v.20, n.2, p.72-75, 2015.

CANETTI, A. **Alteração da floresta urbana, poluição atmosférica e crescimento diamétrico de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em polo industrial**. 101 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CANETTI, A.; MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M.; NETTO, S. P. Life pattern of urban trees: growth-modelling approach. **Urban Ecosystems**, v.20, n.5, p.1057-1068, 2017.

CARSJENS, G. J.; LIGTENBERG, A. A GIS-based support tool for sustainable spatial planning in metropolitan areas. **Landscape and Urban Planning**, v.80, n.1-2, p.72-83, 2007.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Brasília: EMBRAPA – Informação Tecnológica. Colombo: Embrapa Florestas, 2003, v.1, 1039 p.

CAVALLI, J. P. **Caracterização e modelagem do crescimento da copa e do incremento de árvores isoladas de *Cedrela fissillis* Vell.** 2013. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2013.

CEMIG - **Companhia Energética de Minas Gerais. Manual de arborização**. Belo Horizonte: Cemig / Fundação Biodiversitas, 2011. 112 p.

ČERMÁK, J.; HRUSKA, J.; MARTINKOVÁ; PRAX, A. Urban tree root systems and their survival near houses analyzed using ground penetrating radar and sap flow techniques. **Plant and Soil**, v.219, n.1-2, p.103-116, 2000.

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.

CUBAS, R. **Restabelecimento de *Araucaria angustifolia* e *Ocotea porosa* após sete décadas da exploração florestal.** 118 f. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CUNHA, T. A. D. **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na floresta amazônica.** 88 f. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

DAHLHAUSEN, J.; BIBER, P.; RÖTZER, T.; UHL, E.; PRETZSCH, H. Tree species and their space requirements in six urban environments worldwide. **Forests**, Germany, v.7, n.6, p.111, 2016.

DIELEMAN, F.; WEGENER, M. Compact City and Urban Sprawl. **Built Environment**, v.30, n.4, p.308–323, 2004.

DURLO, M. A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Well.) Mart. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.141-149, 2001.

DURLO, M. A; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.8, n.1, p.55-66, 1998.

DURLO, M.A.; SUTILI, F.J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* Vellozo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.14, n.2, p.79-89, 2004.

FERNÁNDEZ-SARRÍA, A.; MARTÍNEZ, L.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; SAJDAK, M.; ESTORNELL, J.; RECIO, J. A. Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. **Computers and electronics in agriculture**, v.90, p.176-185, 2013.

FERREIRA, P. V. **Estatística experimental aplicada à Agronomia.** Maceió: EDUFAL. 2000. 422p.

FICHTNER, A.; STURM, K.; RICKERT, C.; VON OHEIMB, G.; HÄRDTLE, W. Crown size-growth relationships of European beech (*Fagus sylvatica* L.) are driven by the interplay of disturbance intensity and inter-specific competition. **Forest Ecology and Management**, v.302, p.178-184, 2013.

FOLLETT, M. **Branch growth response to pruning: development and testing of a new approach to measuring branch extension in trees.** 2016. 56 f. Dissertação (Mestrado em Biologia) – Université du Québec à Montréal, Montreal, 2016.

FRELICH, L. E. **Predicting dimensional relationships for Twin Cities shade trees.** St. Paul: University of Minnesota, Department of Forest Resources, 1992. 35 p.

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.

GHOLAMI, V.; CHAU, K. W.; FADAEI, F.; TORKAMAN, J.; GHAFFARI, A. Modeling of groundwater level fluctuations using dendrochronology in alluvial aquifers. **Journal of Hydrology**, v.529, p.1060–1069, 2015.

GRABOSKY, J; GILMAN, E. Measurement and prediction of tree growth reduction from tree planting space design in established parking lots. **Journal of Arboriculture**, v.30, n.3, p.154-164, 2004.

GRIMMOND, C. S. B.; BLACKETT, M.; BEST, M. J.; BAIK, J. J.; BELCHER, S. E.; BERINGER, J.; BOHNENSTENGEL, S. I.; CALMET, I.; CHEN, F.; COUTTS, A.; DANDOU, A.; FORTUNIAK, K.; GOUVEA, M. L.; HAMDI, R.; HENDRY, M.; KANDA, M.; KAWAI, T.; KAWAMOTO, Y.; KONDO, H.; KRAYENHOFF, E. S.; LEE, S. H.; LORIDAN, T.; MARTILLI, A.; MASSON, V.; MIAO, S.; OLESON, K.; OOKA, R.; PIGEON, G.; PORSON, A.; RYU, Y. H.; SALAMANCA, F.; STEENEVELD, G. J.; TOMBROU, M.; VOOGT, J. A.; YOUNG, D. T.; ZHANG, N. Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison. **International Journal of Climatology**, v.31, n.2, p.244–272, 2011.

GUTSELL, S.L.; E.A. JOHNSON. Accurately ageing trees and examining their height-growth rates: Implications for interpreting forest dynamics. British Ecological Society. **Journal of Ecology**, v.90, n.1, p.153–166, 2002.

HARRIS, R. W.; CLARK, J. R.; MATHENY, N. P. **Tree Hazard Management. Arboriculture**. New Jersey, 1999.

HEMERY, G. E.; SAVILL, P. S.; PRYOR, S. N. Applications of the crown diameter–stem diameter relationship for different species of broadleaved trees. **Forest ecology and management**, v.215, n.1, p.285-294, 2005.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas do Censo Demográfico 2010**. <https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>. Acesso em: 11 de março de 2019.

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.

JUTRAS, P. **Modeling of Urban Tree Growth with Artificial Intelligence and Multivariate Statistics**. 2008. 394f. Tese (Doutorado em Filosofia) McGill University Montreal, Quebec, 2008.

KIM, H. J.; LEE, S. H. Developing the volume models for 5 major species of street trees in Gwangju metropolitan city of Korea. **Urban forestry & urban greening**, v.18, p.53-58, 2016.

KOHLER, S. V.; FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, H. S.; ARCE, J. E.; SOUZA, F. A. R.; SERPE, E. L. Estratégias de agrupamento de dados para a modelagem hipsométrica e seus reflexos na estimativa de volume em plantios de *Pinus* spp. **Floresta**, v.47, n.3, 2017.

- KONIJNENDIJK, C. C.; RICARD, R. M.; KENNEY, A.; RANDRUP, T. B. Defining urban forestry—A comparative perspective of North America and Europe. **Urban forestry & urban greening**, v.4, n.3, p.93-103, 2006.
- LARSEN, F.K.; KRISTOFFERSEN, P. *Tilia's* physical dimensions over time. **Journal of Arboriculture**, v.28, n.5, p.209-214, 2002.
- 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.
- LIU, G.; LI, Z.; BAO, M. Colchicine-induced chromosome doubling in *Platanus acerifolia* and its effect on plant morphology. **Euphytica**, v.157, n.1-2, p.145-154, 2007.
- LIVNY, Y.; PIRK, S.; CHENG, Z.; YAN, F. **Texture-lobes for tree modelling**. ACM, 2011. 53p.
- LOCKHART, B. R.; WEIH JR, R. C.; SMITH, K. M. Crown radius and diameter at breast height relationships for six bottomland hardwood species. **Journal of the Arkansas Academy of Science**, v.59, n.1, p.110-115, 2005.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, São Paulo, 2000. 384 p.
- LORENZI, H.; SOUZA, H. M.; TORRES, M. A. V.; BACHER, L. B.; **Árvores Exóticas do Brasil: Madeiras, Ornamentais e Aromáticas**. Nova Odessa: Instituto Plantarum, São Paulo, 2003. 382 p.
- 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.
- LUKASZKIEWICZ, J.; KOSMALA, M. Determining the age of streetside trees with diameter at breast height-based multifactorial model. **Arboriculture and Urban Forestry**, v.34, n.3, p. 137-143, 2008.
- MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO, D. J. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. **Ciências Exatas e Naturais**, v.4, n.2, p.185-197, 2002.
- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. Guarapuava: UNICENTRO, 2014, 316 p.
- MARTIN, N. A.; CHAPPELKA, A. H.; LOEWENSTEIN, E. F.; KEEVER, G. J.; SOMERS, G. Predictive open-grown crown width equations for three oak species planted in a southern urban locale. **Arboriculture and Urban Forestry**, v.38, n.2, p.58, 2012.
- MATTOS, P. P.; TEIXEIRA, L. L.; SEITZ, R. A.; SALIS, S. M.; BOTOSSO, P. C. **Anatomia de madeiras do Pantanal Mato-Grossense: características microscópicas**. Colombo: Embrapa Florestas; Corumbá, Embrapa Pantanal, 2003. 182 p.

MAYER, C. L. D. **Análise de conflitos da arborização de vias públicas utilizando sistemas de informações geográficas: caso Irati, Paraná.** Irati, 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro – Oeste, PR, 2012.

MCHALE, M. R.; BURKE, I. C.; LEFSKY, M. A.; PEPER, P. J.; MCPHERSON, E. G. Urban forest biomass estimates: Is it important to use allometric relationships developed specifically for urban trees? **Urban Ecosyst**, v.12, p.95-113, 2009.

MCPHERSON, E. G. Sacramento's parking lot shading ordinance: environmental and economic costs of compliance. **Landscape and Urban Planning**, v.57, p.105–123, 2001.

MCPHERSON, E. G. Urban forestry: the final frontier? **Journal of Forestry**, v.101, n.3, p.20–25, 2003.

MCPHERSON, E. G.; DOORN, N. S. V.; PEPER, P. J. **Urban Tree Database and Allometric Equations.** Albany, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Research Station. 2016. 86 p.

MCPHERSON, E. G.; PEPER, P. J. Urban tree growth modeling. **Journal of Arboriculture & Urban Forestry**, v.38, n.5, p.175-183, 2012.

MCPHERSON, E. G.; ROWNTREE, R. A. Energy conservation potential of urban tree planting. **Journal of Arboriculture**, v.19, n.6, p.321-321, 1993.

MENDONÇA, A. R.; SILVA, J. C.; AOZAI, T. S.; SILVA, E. R.; SANTOS, J. S.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, G. F. Estimação da altura total de árvores de ipê felpudo utilizando modelos de regressão e redes neurais artificiais. **Revista brasileira de biometria**, [S.l.], v.36, n.1, p.128-139, 2018.

MILANI, J. E. F.; ZEA-CAMAÑO, J. D.; BIONDI, D. Crescimento de *Acer negundo* na arborização urbana de Curitiba-PR por meio de análise dos anéis de crescimento. **Advances in Forestry Science**, v.4, n.4, p.161-166, 2018.

MILANO, M. S. **Avaliação e análise da arborização de ruas de Curitiba-PR.** 1984. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1984.

NORTH, E. A. **Predictive equations for crown diameter and trunk flare diameter at ground line for four urban landscape tree species in Minnesota.** 97 f. 2013. (Master of science) - University of Minnesota, 2013.

NOWAK, D. J.; MCBRIDE, J. R.; BEATTY, R. A. Newly planted street tree growth and mortality. **Journal of Arboriculture**, v.16, n.5, p.124–129, 1990.

NOWAK, D. J.; NOBLE, M. H.; SISINNI, S. M.; DWYER, J. F. People and trees: assessing the US urban forest resource. **Journal of Forestry**, v.99, n.3, p.37-42, 2001.

- NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, v.42, p.110-122, 2001.
- PEDERSEN, A. O.; NYHUUS, S.; BLINDHEIM, T.; KROG, O. M. W. Implementation of a GIS-based management tool for conservation of biodiversity within the municipality of Oslo, Norway. **Landscape and Urban Planning**, v.68, n.4, p.429–438, 2004.
- PEPER, P J.; MCPHERSON, E. G. Comparison of five methods for estimating leaf area index of open-grown deciduous trees. **Journal of Arboriculture**, v.24, n.1, p.98-111, 1998.
- PEPER, P. J., ALZATE, C. P., MCNEIL, J. W.; HASHEMI, J. Allometric equations for urban ash trees (*Fraxinus* spp.) in Oakville, Southern Ontario, Canada. **Urban forestry & urban greening**, v.13, n.1, p.175-183, 2014.
- PEPER, P.J.; E.G. MCPHERSON; S.M. MORI. Equations for predicting diameter. height. crown radius and leaf area of San Joaquin Valley street trees. **Journal of Arboriculture**, v.27, p.306–317, 2001a.
- PEPER, P.J.; E.G. MCPHERSON; S.M. MORI. Predictive equations for dimensions and leaf area of coastal South California street trees. **Journal of Arboriculture**, v.27, p.169–180, 2001b.
- 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.
- PREUHSLE, T. Ertragskundliche Merkmale oberbayerischer Bergmischwald-Verjüngungsbestände auf kalkalpinen Standorten im Forstamt Kreuth. **Forstwissenschaftliches Centralblatt**, v.100, n.1, p.313-345, 1981.
- PURVES, D. W.; LICHSTEIN, J. W.; PACALA, S. W. Crown plasticity and competition for canopy space: a new spatially implicit model parameterized for 250 North American tree species. **PLoS One**, v.2, n.9, p.870, 2007.
- QUIGLEY, M. F. Franklin Park: 150 years of changing design, disturbance, and impact on tree growth. **Urban Ecosyst**, v.6, n.1, p.223–235, 2002.
- QUIGLEY, M. F. Street trees and rural conspecifics: will long-lived trees reach full size in urban conditions? **Urban Ecosystems**, v.7, n.1, p.29-39, 2004.
- RAHMAN, M. A.; MOSER, A.; GOLD, A.; RÖTZER, T.; PAULEIT, S. Vertical air temperature gradients under the shade of two contrasting urban tree species during different types of summer days. **Science of the Total Environment**, v.633, p.100-111, 2018.
- REINEKING, B.; HUTH, A.; WISSEL, C. Generic process-based plant models for the analysis of landscape change. **University of Osnabrück**, Germany. p.887–894, 2004.

RIBEIRO, F. A. B. S. Arborização urbana em Uberlândia: percepção da população. **Revista da Católica**, Uberlândia, v.1, n.1, p.224-237, 2009.

ROCHA, R. T.; LELES, P. S. S.; OLIVEIRA NETO, S.N. Arborização de vias públicas em Nova Iguaçu, RJ: o caso dos bairros Rancho Novo e Centro. **Árvore**, Viçosa, v. 28, n.4, p.599-607, 2004.

RÖHLE, H. Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien. **Forstarchiv**, v.57, p.67-71, 1986.

ROMAN, M.; BRESSAN, D. A.; DURLO, M. A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. ex Steud. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.19, n.4, p.473-480, 2009.

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. **Embrapa Florestas-Comunicado Técnico (INFOTECA-E)**, 2014.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; JACON, A. D. Crown area and trunk diameter relationship for tree species at a mixed-araucaria natural forest in the mid-southern Parana state, Brazil. **Floresta**, Curitiba, v.41, n.1, p.63-72, 2011.

SANQUETTA, C. R.; DALLA CORTE, A. P.; ROGL, A.; PIMENTEL, A. Relações diâmetro-altura para espécies lenhosas em um fragmento de floresta Ombrófila Mista no Sul do Paraná. Iheringia. **Série Botânica**, v.68, n.1, p.103-114, 2013.

SAUERESSIG, D. **Plantas do Brasil: árvores nativas**. Irati: Editora Plantas do Brasil, 2014. 432 p.

SCHALLENBERGER, L. S.; ARAUJO, A. J.; ARAUJO, M. N.; DEINER, L. J.; MACHADO, G. O. Avaliação da condição de árvores urbanas nos principais parques e praças do município de Irati-PR. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba-SP, v.5, n.2, p.105-123, 2010.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, C. A. G. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: Facos-UFSM, 2008. 566 p.

SCHOCH, W.; HELLER, I.; SCHWEINGRUBER, F. H.; KIENAST, F. **Wood anatomy of central European species**. 2004. Online version: www.woodanatomy.ch. Acesso em: 16 de outubro de 2018.

SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic Expression of the Timber Volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SELLE, G. L.; VUADEN, E. Crescimento de seis espécies nativas na região central do estado do Rio Grande do Sul. Growth of six native species in the central area of the state of Rio Grande do Sul. **Ambiência**, v.6, n.1, p.169-192, 2010.

SEMENZATO, P.; CATTANEO, D.; DAINESE, M. Growth prediction for five tree species in an Italian urban forest. **Urban forestry & urban greening**, v.10, n.3, p.169-176, 2011.

SILVA, A. G.; PAIVA, H. N.; GONÇALVES, W. **Avaliando a arborização urbana**. Viçosa – MG: Aprenda Fácil, 2007. 346p.

STAUDHAMMER, C. L. ESCOBEDO, F.; LAWRENCE, A.; DURYEA, M.; SMITH, P.; MERRITT, M. Rapid assessment of change and hurricane impacts to Houston's urban forest structure. **Arboriculture and Urban Forestry**, v.37, n.2, p.60–66, 2011.

STEPKA, T. F. **Modelagem do crescimento e dendrocronologia em árvores nativas de *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* e *Ocotea porosa* no sul do Brasil**. Curitiba, 2012. 207 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2012.

STOFFBERG, G. H.; VAN ROOYENA M. W.; VAN DER LINDE, M. J.; GROENEVELD, H. T. Carbon sequestration estimates of indigenous street trees in the City of Tshwane, South Africa. **Urban forestry & urban greening**, v.9, n.1, p.9-14, 2010.

SUZUKI, A. Influence of shoot architectural position on shoot growth and branching patterns in *Cleyera japonica*. **Tree Physiology**, Victoria – Canadá, v.22, p.885-890, 2002.

SUZUKI, A. Patterns of vegetative growth and reproduction in relation to branch orders: the plant as a spatially structured population. **Trees Physiology**, Kyoto, v.14, p.329–333, 2000.

TONINI, H.; ARCO VERDE, M. F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia, Brasília. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.47, p.633-638, 2005.

TROXEL, B.; PIANA, M.; ASHTON, M. S.; MURPHY-DUNNING, C. Relationships between bole and crown size for young urban trees in the northeastern USA. **Urban forestry & urban greening**, v.12, n.2, p.144-153, 2013.

VALÉRIO, Á. F; WATZLAWICK, L. F; SAUERESSIG, D; PUTON, V; PIMENTEL, A. Análise da composição florística e da estrutura horizontal de uma Floresta Ombrófila Mista Montana, município de Irati, PR – Brasil. **Rev. Acad. Ciênc. Agrár. Ambient** - Curitiba, v.6, n.2, p.137-147, 2008.

WEBER, K. S. **Manejo da bracatinga (*Mimosa scrabella* Benth.) baseado no crescimento diamétrico de árvores individuais**. Curitiba, 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2007.

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.

YOON, T. K.; YOONA, T. K.; PARKA, C. W.; LEEA, S. J.; KOA, S.; KIMB, K. N.; SONB, Y.; LEEB, K. H.; OHC, S.; LEE, W.K.; SON, Y. Allometric equations for estimating the aboveground volume of five common urban street tree species in Daegu, Korea. **Urban forestry & urban greening**, v.12, n.3, p.344-349, 2013.

ZANON, M. L. B.; FINGER, C. A. G. Relationship of meteorological variables with the growth of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze trees in implanted stands. **Ciência Florestal**, v.20, n.3, p.467-476, 2010.

ZHOU, Y.; ZHOU, J.H. The urban eco-environmental estimation system based on 3-dimension crown volume. **Chinese Landscape Architecture**, v.5, p.77-79, 2001.