

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**THAMIRES DE SOUZA CARVALHO**

**INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM ESPÉCIES DA ARBORIZAÇÃO URBANA  
COM O USO DE *TREE MOTION SENSORS* - TMS**

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**THAMIRES DE SOUZA CARVALHO**

**INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM ESPÉCIES DA ARBORIZAÇÃO URBANA  
COM O USO DE *TREE MOTION SENSORS* - TMS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Angeline Martini  
Coorientadora: Marina Moura de Souza

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2020**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

C331i  
2020  
Carvalho, Thamires de Souza, 1991-  
Inclinação da placa de raízes em espécies da arborização  
urbana com o uso de *Tree Motion Sensors* – TMS / Thamires de  
Souza Carvalho. – Viçosa, MG, 2020.  
84 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Angeline Martini.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.  
Referências bibliográficas: f.77-84.

1. Arborização das cidades. 2. Oscilação. 3. Ventos.  
4. Poda. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência  
Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.9273

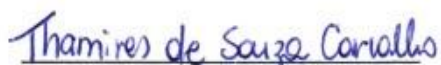
THAMIRES DE SOUZA CARVALHO

INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM ESPÉCIES DA ARBORIZAÇÃO  
URBANA COM O USO DE *TREE MOTION SENSORS* – TMS

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

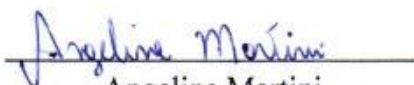
APROVADA: 28 de fevereiro de 2020.

Assentimento:



Thamires de Souza Carvalho

Autora



Angeline Martini

Orientadora

*"Por vezes, sentimos que aquilo que fazemos não é, senão, uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota".*

Madre Teresa de Calcutá

## AGRADECIMENTOS

Gratidão a Deus pela proteção e por todas as bênçãos que me foram concedidas.

Aos meus pais, Hércio e Isabel, pela doação e amor dedicados a mim por toda a vida. E ao meu irmão, Vinícius, por me incentivar, ouvir e por sempre me apoiar. Vocês são minha base e minha força.

Ao meu companheiro, Fabrício, por todo seu amor, paciência, dedicação e por nunca medir esforços para me ajudar.

À minha orientadora, Angeline Martini, pelas importantes orientações. Sou grata pelos ensinamentos, contribuições profissionais e acadêmicas, pela dedicação e presença.

Gostaria de agradecer a CEMIG Distribuição pelo empréstimo dos equipamentos indispensáveis para a realização da pesquisa, em especial a Engenheira de Meio Ambiente, Marina Moura de Souza (Gerência de Estratégia e Controle da Expansão e Manutenção Preventiva da Média e Baixa Tensão da Distribuição) por viabilizar esse empréstimo.

Ao Dr. Antônio Marcos Rosado, pela colaboração, paciência e apoio durante o processo de elaboração da dissertação.

Aos membros da banca pelas sábias correções, disponibilidade e contribuições para o aperfeiçoamento do trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento e apoio desta pesquisa.

À Universidade Federal de Viçosa, ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade concedida para realização do mestrado. E aos seus funcionários, em especial, Alexandre, Dílson, Chiquinho, Paulo, Bete, Tadeu e Dôra que sempre me ajudaram.

Aos amigos do “Laboratório do Futuro”, sou grata pelas ajudas, pelo auxílio na coleta de dados, pela convivência agradável e tranquila por todo esse tempo.

Aos amigos e colegas da vida, pelo companheirismo, pela ajuda nas coletas, pelo carinho, apoio e por todas as conversas e conselhos. Em especial à República Scamanacho e D. Eliana, que foram minha família em Viçosa.

Agradeço a todas as mulheres que lutaram e lutam até hoje para que eu e tantas outras possamos realizar nossos sonhos, protagonizar nossas histórias e ocupar nossos lugares na ciência.

A todos que de alguma forma ajudaram e torceram por mim, vocês tornaram essa caminhada mais leve.

## RESUMO

CARVALHO, Thamires de Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2020. **Inclinação da placa de raízes em espécies da arborização urbana com o uso de *Tree Motion Sensors* – TMS** Orientadora: Angeline Martini. Coorientadora: Marina Moura de Souza.

As árvores são inestimáveis para a paisagem urbana e desempenham funções ecológicas, sociais e econômicas. No entanto, a condição hostil que o meio urbano oferece contribui para que esses indivíduos se tornem frágeis e menos estáveis. A queda de árvores é um problema grave e neste contexto é importante conhecer o comportamento da ancoragem das espécies utilizadas na arborização. O objetivo deste estudo foi avaliar a qualidade da ancoragem de espécies utilizadas na arborização urbana e estabelecer parâmetros com base no comportamento da inclinação da placa de raízes. Para isso foram analisadas inclinações da placa de raízes de árvores plantadas em condições ideais, assim como o impacto dos diferentes tipos de poda na ancoragem e o comportamento da inclinação em diferentes condições de canteiro. Para a coleta foram utilizados sensores (TMS), que registram a inclinação real da placa de raízes. As variáveis inclinação máxima e média da árvore e o número de ocorrências de inclinação foram obtidas para os três diferentes tratamentos, e foram correlacionadas com variáveis dendrométricas para indivíduos em condições ideais. Para analisar a relação da inclinação e rajada de vento máxima elaborou-se um diagrama de dispersão. Gráficos radares permitiram observar a oscilação da placa de raízes, indicando a resposta direcional da árvore à ação do vento. Para a influência dos tipos de poda e as diferentes condições de canteiro realizou-se teste estatístico comparando as diferentes situações. Também foram apresentados gráficos para evidenciar o valor de inclinação máxima e média das espécies. Os resultados indicaram forte correlação entre inclinação e as variáveis dendrométricas, indicando que maiores valores de DAP e diâmetro de copa apresentaram melhor ancoragem. Os valores de inclinação máxima encontrados para as nove espécies estudadas em condição ideal foram: *Licania tomentosa* (0,1540°); *Ceiba speciosa* (0,1092°); *Spathodea campanulata* (0,1799°); *Delonix regia* (0,2793°); *Caesalpinia peltophoroides* (0,3959°); *Lagerstroemia speciosa* (1,8314°); *Handroanthus serratifolius* (0,6839°); *Handroanthus impetiginosus* (0,1841°); *Libidibia ferrea* (0,1881°). *Lagerstroemia speciosa* foi considerada a menos estável dentre as espécies. Aproximadamente 51% dos elementos que influenciaram na inclinação foram explicados apenas pela rajada de vento e a maioria das

árvores apresentou inclinação no sentido sudoeste/nordeste. Observou-se maior estabilidade em indivíduos sem interferência de poda, a poda unilateral foi considerada a menos estável e a em V a mais favorável. As árvores plantadas em condições ideais apresentaram melhores condições. Conclui-se que os resultados encontrados fornecem indícios dos valores de inclinação da placa de raízes de árvores permitindo estabelecer padrões que podem ser utilizados como referência para análises futuras quanto à estabilidade das espécies.

Palavras-chave: Ancoragem. Estabilidade. Vento. Poda. Área de canteiro.

## ABSTRACT

CARVALHO, Thamires de Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2020. **Slope of the root plate in urban tree species using *Tree Motion Sensors* – TMS** Adviser: Angeline Martini. Co-adviser: Marina Moura de Souza.

Trees are invaluable for the urban landscape and perform ecological, social and economic functions. However, the hostile conditions in the urban environment contribute to these individuals becoming fragile and unstable. Tree falling is a serious problem and, in this context, it is important to know the anchoring behavior of species used in afforestation. This study aimed to evaluate the anchorage quality of tree species used in urban afforestation and to establish parameters based on the inclination of the root plate behavior. For this purpose, the inclination of trees planted under ideal conditions were analyzed and the impact of different types of pruning (L-shaped, unilateral and V-shaped pruning) on tree anchoring and the inclination behavior in different planting conditions (restricted and intermediate tree bed) was compared to the trees in ideal condition. We used sensors (TMS) to record the real inclination of the root plate. The maximum and average tree inclination values and the number of oscillations were obtained for the three treatments and were correlated to the dendrometric measurements of individuals in ideal conditions. In order to analyze the relationship between inclination and maximum wind gust, a dispersion diagram was created. Radar charts allowed us to observe the root plate movement indicating the directional response of the tree to the action of the wind. To assess the influence of pruning types and tree bed conditions, a statistical test was carried out comparing the maximum and average inclinations, the number of trees with balanced crowns and the different types of pruning, as well as the ideal planting condition and the different tree bed conditions. We also presented charts to show the maximum and average inclination values for the species. The results demonstrate a strong correlation between inclination and dendrometric measurements indicating that trees with higher DBH and crown diameter have better anchorage. The maximum inclination values found for the nine species under ideal conditions were: *Licania tomentosa* (0.1540°); *Ceiba speciosa* (0.1092°); *Spathodea campanulata* (0.1799°); *Delonix regia* (0.2793°); *Caesalpinia peltophoroides* (0.3959°); *Lagerstroemia speciosa* (1.8314°); *Handroanthus serratifolius* (0.6839°); *Handroanthus impetiginosus* (0.1841°); and *Libidibia ferrea* (0.1881°). The species *Lagerstroemia speciosa* was considered the least stable among the species. Approximately 51% of the elements that influenced the inclination were

explained only by the wind gust and most of the trees presented an inclination in the southwest/northeast direction. We observed greater stability in trees without pruning interference. The unilateral pruning was considered the least stable and V-shaped pruning was the most favorable. The trees planted in ideal conditions showed better anchorage and, although the trees in restricted tree bed had lower inclination values than in the intermediate tree bed, this result does not indicate that they were more stable as uncontrolled external factors may have contributed to this result. We conclude that the results provide evidences for tree root plate inclination values, allowing the establishment of standards to be used as a reference for future analyzes regarding tree species stability.

**Keywords:** Anchoring. Stability. Wind. Pruning. Restricted Tree Bed.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do <i>campus</i> da UFV, bem como o município de Viçosa e o estado de Minas Gerais.....	32
Figura 2 - Árvores em condição ideal de plantio (com espaço suficiente para o pleno desenvolvimento de sua copa e raiz) .....	34
Figura 3 - Diferentes tipos de podas de desobstrução: poda em L, poda unilateral e poda em V .....	35
Figura 4 - Árvores em diferentes condições de canteiro: canteiro restrito e canteiro intermediário.....	36
Figura 5 - Equipamento utilizado: <i>Tree Motion Sensors</i> (TMS) Argus Electronic GMBH ....	38
Figura 6 - Média da inclinação máxima para cada espécie (esquerda) e por um indivíduo da espécie (direita).....	51
Figura 7 - Diagrama de dispersão entre a inclinação máxima e rajada de vento máxima.....	53
Figura 8 - Resultados dos pontos de oscilação para cada indivíduo e porcentagem de tempo monitorado em que a árvore apresentou inclinação .....	54
Figura 9 - Porcentagem de tempo com ocorrências de inclinação para cada espécie separados por tipo de poda – Copa Natural (NAT), poda em L (L), Unilateral (UNI) e poda em V (V) .	61
Figura 10 - Inclinação máxima e média da placa de raízes em diferentes formatos de copa para as espécies <i>Caesalpinia Peltophoroides</i> e <i>Delonix Regia</i> .....	65
Figura 11 - Inclinação máxima (esquerda) e média (direita) da placa de raízes em canteiro ideal e restrito .....	69
Figura 12 - Inclinação máxima (esquerda) e média (direita) da placa da raiz em canteiro ideal e intermediário .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Inclinação da placa de raiz e caracterização das árvores em condição ideal de plantio .....	46
Tabela 2: Resultado da correlação de Pearson aplicada entre variáveis dendrométricas e as variáveis de inclinação analisadas .....	49
Tabela 3: Inclinação máxima e média da placa de raízes em diferentes tipos de copa .....	59
Tabela 4: Análise estatística das variáveis de inclinação para os diferentes tipos de poda (Teste F e Teste t) .....	63
Tabela 5: Inclinação das árvores em situações de canteiro ideal e restrito .....	67
Tabela 6: Inclinação da placa de raízes das árvores em situações de canteiro ideal e intermediário.....	70
Tabela 7: Análise estatística das variáveis de inclinação para os diferentes tipos de condição de plantio (Teste F e teste t).....	73

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	13
1.1	Objetivo .....	15
1.1.1	Objetivo geral .....	15
1.1.2	Objetivos específicos .....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	16
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE A ARBORIZAÇÃO URBANA.....	16
2.1.1	A importância das árvores nas cidades.....	16
2.1.2	Problemas gerados pela falta de planejamento.....	17
2.1.3	Espécies mais comuns na arborização.....	20
2.2	PANORAMA GERAL SOBRE A ESTABILIDADE ESTRUTURAL DAS ÁRVORES URBANAS.....	21
2.2.1	Ancoragem.....	22
2.2.2	Estabilidade .....	23
2.2.3	Biomecânica das árvores .....	25
2.3	PRINCIPAIS FATORES QUE INTERFEREM NA ESTABILIDADE DAS ÁRVORES.....	27
2.3.1	Agentes naturais .....	27
2.3.2	Ações de implantação e manejo da arborização.....	28
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	31
3.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	31
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....	33
3.2.1	Seleção dos exemplares arbóreos .....	33
3.2.2	Coleta de dados para a inclinação da placa de raiz.....	37
3.2.3	Processamento dos dados .....	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	46
4.1	INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM CONDIÇÕES IDEAIS DE PLANTIO .....	46
4.1.1	Comportamento de diferentes espécies e suas características .....	46
4.1.2	Influência das variáveis dendrométricas.....	49
4.1.3	Inclinação máxima para cada espécie.....	51
4.1.4	Relação entre a inclinação da placa de raízes e a rajada de vento.....	52
4.1.5	Ocorrência de oscilação para cada indivíduo arbóreo .....	54

4.2	INFLUÊNCIA DA PODA NA INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES.....	58
4.2.1	Inclinação da placa de raízes para diferentes espécies .....	58
4.2.2	Número de ocorrência de inclinação por espécie .....	61
4.2.3	Diferença estatística entre os tipos de poda.....	63
4.2.4	Análise em condição simultânea de monitoramento .....	64
4.3	INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CANTEIRO .....	67
4.3.1	Comportamento em canteiro restrito .....	67
4.3.2	Comportamento em canteiro intermediário .....	70
4.3.3	Diferença estatística entre as condições de canteiro.....	73
5	CONCLUSÃO .....	75
	REFERÊNCIAS .....	77

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, 86% da população reside em cidades, estimativa esta, caracterizada como a maior de todos os tempos (UNITED NATIONS, 2018). Esse aumento da concentração de pessoas nas cidades ao longo da evolução da sociedade humana trouxe mudanças significativas para o meio, como: a redução da cobertura vegetal; o aumento do número de edificações e áreas impermeáveis; enchentes; aparecimento de ilhas de calor devido à elevação da temperatura; maior número de veículos; poluição dos recursos hídricos, do ar, sonoro e visual (DA ROCHA; LELES; NETO; 2004). Além disso, muitos problemas foram acentuados devido à urbanização ter ocorrido sem um planejamento adequado na maioria das cidades.

Na busca por melhorar a qualidade de vida da população, surgiu a necessidade de elaborar políticas públicas que permitam essa harmonização entre o desenvolvimento econômico e a preservação ambiental (BOBROWSKI; BIONDI; 2012). Nesse contexto, a arborização urbana atua como uma ferramenta para mitigar os efeitos ambientais negativos provocados pela urbanização (PAIVA; GONÇALVES, 2002; JAMES; HARITOS; ADES, 2006).

A presença de árvores no meio urbano desempenha inúmeras funções e sua importância vai além do caráter estético, pois dispõe também de inúmeros benefícios ecológicos, sociais e econômicos. A arborização urbana estabiliza e melhora a temperatura, minimiza os efeitos decorrentes da poluição, proporciona alimento e abrigo para a fauna, além de contribuir para o lazer e bem estar da população, o que reforça a importância de administrá-la segundo princípios técnicos e científicos (LEITÃO, 2016; DE MELO; DE LIRA FILHO; JÚNIOR; 2019).

É fundamental que as árvores consigam oferecer esses benefícios ao meio urbano, para isso se faz necessário proporcionar também a elas condições apropriadas para seu desenvolvimento, garantindo medidas eficientes no planejamento, implantação e manejo da arborização. Entretanto, a realidade é outra, um dos grandes problemas observados na arborização urbana é justamente o ambiente hostil fornecido para o desenvolvimento das árvores. Como exemplo, podem ser citadas as podas necessárias para resolver conflitos com equipamentos urbanos, a compactação do solo e os canteiros restritos que afetam o acesso das raízes a elementos essenciais (RIBEIRO, 2011; ROSSETTI; PELLEGRINO; TAVARES, 2010).

A condição estressante imposta às árvores contribui para que estas apresentem um comportamento diferente daquele esperado no habitat natural, com chances, inclusive, de fragilizá-las e torná-las menos estáveis. Como diversos municípios brasileiros apresentam arborização formada por plantios antigos, oriundos de planejamento e técnicas de manejo pouco ou mal orientadas, além do monitoramento mais frequente e das práticas de manejo corretas, torna-se fundamental os avanços científicos para auxiliar na previsão do risco de queda das árvores.

A queda de árvores é um problema grave que ocorre em várias cidades no mundo, seja por consequência da idade avançada dos indivíduos, pela poluição das cidades que afeta as condições fitossanitárias da planta, por chuvas fortes e vendavais, podas irregulares ou ainda, pelo sistema radicular instável (SAMPAIO et al., 2010; PEREIRA et al., 2011).

No Brasil, perdas humanas e/ou materiais causadas pela queda de árvores após vendavais e tempestades são ocorrências frequentes (PEREIRA et al., 2011). Na cidade de São Paulo - SP registrou-se mais de duas mil quedas de árvores urbanas somente nos meses de janeiro e fevereiro de 2019, assim como em Belo Horizonte - MG onde os registros de quedas aumentam nas épocas de chuva (APPLE, 2019; FÓRNEAS, 2019).

Notícias como estas se tornaram recorrentes nas grandes cidades nos últimos anos, o que interfere negativamente na forma como as pessoas percebem a arborização urbana. Segundo Rossetti, Pellegrino e Tavares (2010), impactos como esses, onde a vegetação provoca situações caóticas, contribui para opiniões extremas, ou a população fica totalmente contrária à permanência de árvores nos passeios ou são altamente favoráveis, por acreditarem que os benefícios que a arborização urbana gera são maiores que os prejuízos.

Neste contexto, como a estabilidade estrutural de uma árvore e a sua resistência à queda dependem da força das raízes e a área ao redor da base da árvore, conhecida como placa de raízes, é responsável pela sua ancoragem no solo (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013a), torna-se importante conhecer o comportamento das espécies utilizadas na arborização brasileira quanto à possibilidade de falha da ancoragem. Para isso, é necessário medir precisamente o ângulo de rotação da placa de raízes, influenciado pelo vento e outros fatores externos.

## **1.1 Objetivo**

### **1.1.1 Objetivo geral**

O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar a qualidade da ancoragem de espécies utilizadas na arborização urbana, com base no comportamento de inclinação da placa de raízes, em vista de estabelecer parâmetros base para o diagnóstico do potencial de falha.

### **1.1.2 Objetivos específicos**

Para alcançar o objetivo geral, buscou-se atender aos seguintes objetivos específicos:

- a) Definir o comportamento de inclinação da placa de raízes de espécies plantadas em locais que apresentam condições ideais;
- b) Analisar o impacto dos diferentes tipos de poda na qualidade de ancoragem das árvores urbanas;
- c) Comparar o comportamento de inclinação da placa de raízes em condições ideais com diferentes condições de canteiro – áreas de canteiro restrito e intermediário.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE A ARBORIZAÇÃO URBANA**

#### **2.1.1 A importância das árvores nas cidades**

A artificialidade das cidades, em relação às áreas naturais, têm gerado prejuízos à qualidade de vida da população, que atualmente é representada por 55% de habitantes urbanos, número que sobe para 86,6% no Brasil (UNITED NATIONS, 2018). O desenvolvimento dos centros urbanos ocorreu de maneira rápida, sem um devido planejamento de ocupação e foi responsável por transformações diárias na paisagem (ROLNIK; KLINK; 2011; ROSSETTI; PELLEGRINO; TAVARES, 2010). Essa ocupação irregular gerou consequências como redução da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, poluição dos recursos hídricos, do ar, além da poluição sonora e visual (DA ROCHA; LELES; NETO; 2004).

Nesse contexto, vê-se a necessidade de contornar os danos advindos do processo de urbanização, visando proporcionar uma melhoria na qualidade de vida da população, conciliando o desenvolvimento econômico e a conservação ambiental (BOBROWSKI; BIONDI; 2012). Para isso, o poder público dispõe de medidas técnicas como o planejamento e a implantação de áreas verdes e arborização de ruas (BOBROWSKI, 2011).

As áreas verdes e a arborização de ruas compõe a estrutura da arborização urbana em uma cidade. Devido aos inúmeros benefícios advindos das características naturais das árvores, a arborização atua como principal ferramenta para mitigar os efeitos ambientais negativos provocados pelo avanço da urbanização (PAIVA; GONÇALVES, 2002; JAMES; HARITOS; ADES, 2006). Assim, pesquisadores do ambiente urbano investem no uso da vegetação nas cidades visando proporcionar conforto ambiental e melhora na qualidade de vida (MARTINI et al., 2013).

Além de melhorar a qualidade de vida da população, a arborização urbana proporciona benefícios sociais, econômicos e ambientais, aumentando a habitabilidade dos centros urbanos (MULLANEY; LUCKE; TRUEMAN; 2015b). Também estabiliza e melhora o clima, tem função estética nas cidades, proporciona alimento e abrigo para a fauna e é um fator determinante da salubridade ambiental (DE MELO; DE LIRA FILHO; JÚNIOR; 2019).

O plantio de árvores em ambiente urbano para promover qualidade de vida da população, no entanto, não foi o objetivo principal para o surgimento da arborização. No

Brasil, até o século XIX, os jardins urbanos, com presença de árvores, tinham funções meramente estéticas, embelezadoras da paisagem, sendo considerados uma expressão de arte (DUARTE et al., 2018). Segundo relatos da história, a primeira tentativa de arborização de ruas e avenidas ocorreu com o propósito de embelezar as ruas do Rio de Janeiro para o casamento de D. Pedro I com Maria Leopoldina (LEITÃO, 2016).

O benefício estético promovido pela arborização urbana é inquestionável, entretanto, nos últimos tempos, se evidenciou uma mudança no foco principal de se implantar a arborização, passou a ser mais pela prestação de serviços que as árvores oferecem do que ter exclusivamente um papel estético (SEAMANS, 2013). Assim, a arborização urbana passou de uma função estética para um viés ecológico, social e econômico.

Entre os benefícios ecossistêmicos que a arborização proporciona, podemos citar: a diminuição de temperaturas, que resulta em um decréscimo de ilhas de calor e do consumo de eletricidade; diminuição de escoamento superficial da água; redução da concentração de poluentes atmosféricos; redução de ruído; diminuição do impacto de ventos e da incidência solar em pavimentos e construções; estoque de carbono; valorização imobiliária; produção de alimento; valor estético; espaço para atividades recreativas (AMATO-LOURENÇO et al., 2016).

Além disso, segundo Jiang, Chang e Sullivan (2014), ambientes arborizados ajudam na redução do estresse da população, podendo reduzir muitas doenças, como doença cardiovascular, acidente vascular cerebral, depressão e asma. O conhecimento sobre estes efeitos benéficos que o contato com áreas verdes gera a saúde humana tem crescido nos últimos anos. Já foram relatados impactos significativos em relação à longevidade, doenças cardiovasculares, obesidade, saúde mental, qualidade do sono e recuperação de doenças (AMATO-LOURENÇO et al., 2016).

### **2.1.2 Problemas gerados pela falta de planejamento**

Constantemente os benefícios da arborização não são totalmente percebidos no ambiente urbano. Um dos grandes problemas observados é o próprio ambiente hostil que a maioria das cidades oferece para o desenvolvimento das árvores, que precisam suportar e se desenvolver em condições mais restritivas do que quando em ambiente natural (RIBEIRO, 2011). As restrições introduzidas pela falta de planejamento urbano, responsáveis pelos principais conflitos entre árvores e demais equipamentos consistem em: calçadas estreitas,

vias não projetadas ao plantio de árvores, presença de rede elétrica no mesmo espaço e, fachadas de empreendimentos comerciais em altura semelhante a das árvores adultas (DUARTE et al., 2018).

As árvores urbanas, desta forma, ficam restritas a espaços críticos impostos pelos projetos de paisagismo, o que conseqüentemente diminui a prestação de serviços que podem oferecer (MULLANEY; LUCKE; TRUEMAN; 2015b). Além disso, ficam frequentemente sujeitas a severos estresses ambientais e danos mecânicos, especialmente no sistema radicular, devido à compactação do solo, más condições de plantio e poluição (GHANI; STOKES; FOURCAUD; 2009).

Dentre os desafios encontrados no meio urbano para a sobrevivência das árvores pode-se ressaltar principalmente a poluição atmosférica, contaminação e compactação do solo e as podas mal executadas visando resolver conflitos entre as copas e a rede elétrica aérea (BENATTI et al., 2012; MULLANEY; LUCKE; TRUEMAN; 2015a; ROSSETTI; PELLEGRINO; TAVARES, 2010). É importante destacar que tais desafios apresentam custos para o município como serviços de manutenção, substituição e remoção (ROSSETTI; PELLEGRINO; TAVARES, 2010).

Devido a tais diferenças, impostas pelas cidades, conhecer o comportamento das espécies arbóreas em condições urbanas auxilia para um bom planejamento ambiental (MARTINI et al., 2013). Assim, para que as árvores contribuam de forma positiva na qualidade de vida, faz-se necessário conhecer a arborização de um município para que se possam embasar ações de manejo e manutenção necessárias à conservação das árvores, garantindo um bom desenvolvimento do vegetal no meio modificado (ZAMPRONI, 2018).

Resultados encontrados sobre a arborização viária de Nova Olímpia-PR demonstram que 52,29% das árvores analisadas apresentaram problemas sérios no tronco e na base do tronco, contribuindo para intensificar seu risco de queda (SAMPAIO et al., 2010). Em Boa Vista-RR, 23% das árvores apresentaram severos danos físicos no tronco e na copa (LIMA NETO, 2014). Já em Dois Vizinhos-PR, ao realizarem uma análise de risco, os autores verificaram que 74% das árvores apresentavam alto risco de queda, devido a problemas significativos na copa e a base do tronco (PEREIRA et al., 2011).

Grande parte desse problema deve-se ao plantio das espécies em condições inadequadas. Em Gurupi – TO, 76,3% das árvores que compõe a arborização, foram plantadas em canteiros com área inferior a 1m<sup>2</sup> (OLIVEIRA et al., 2017) e em Itanhaém – SP, 28,5% dos indivíduos arbóreos foram plantados em canteiro totalmente pavimentado, com nenhuma

área livre disponível (MARIA; BIONDI; ZAMPRONI; 2018). No diagnóstico da qualidade fisiológica realizado em Bonito-MS, 50% das árvores de rua foram classificadas como em condições regulares, apresentando condição física e vigor medianos (ZAMPRONI et al., 2018). Já em Nova Olímpia-PR, os autores apontaram que 83% das árvores com risco de queda alto dispunham de uma área permeável com tamanho inapropriado para seu desenvolvimento (SAMPAIO et al., 2010). Tal panorama é alarmante, uma vez que a condição de plantio sob restrição de espaço é uma prática que gera dificuldade na ancoragem da planta e que esteve fortemente associada à queda de árvores em pesquisa desenvolvida na cidade de Belo Horizonte (SOUZA; BITTENCOURT; MARTINI, 2019).

Os diagnósticos permitem inferir também sobre a adequação das práticas de manejo, como necessidade de podas, por exemplo, que também precisa ser planejada. Em Boa Vista-RR, 67% das árvores apresentaram altura de bifurcação abaixo de 1,80 m (LIMA NETO, 2014). Em Bonito-MS esse valor foi de 80% (ZAMPRONI et al., 2018) e no município de São João Evangelista-MG, 90,55% apresentaram essa altura inferior a 2 m (BRANDÃO et al., 2011).

Um dos piores problemas diagnosticados nas árvores de Nova Olímpia-PR foi visualizado na copa, devido a deformação proveniente de podas drásticas e unilaterais (SAMPAIO et al., 2010). Em Boa Vista-RR, 44% das árvores estavam deformadas por poda excessiva, sendo que 61% delas foram plantadas sob redes aéreas (LIMA NETO, 2014). Na região central de Manguieirinha-PR, foi verificado que 58% das árvores sofreram podas drásticas (SCHALLENBERGER; MACHADO, 2013). Já no diagnóstico da arborização viária sob rede elétrica na Regional Oeste de Minas Gerais, verificou-se que 72,8% das árvores apresentaram potencial para gerar conflitos, pois eram espécies que atingem mais do que 6 m de altura e que portanto, exigem manutenção constante (DE OLIVEIRA et al., 2016).

Em um diagnóstico realizado em Bonito, Mato Grosso do Sul, foi constatado que cerca de 44% das árvores apresentaram algum tipo de conflito ou necessitaram de intervenção para reduzir os problemas com os componentes urbanos, tais como rede de energia, comunicação e construções (ZAMPRONI et al., 2018). Outro ponto que merece atenção já que o conflito da árvore com o local foi a principal causa que levou ao corte da espécie *Tipuana tipu*, em Curitiba (DA SILVA et al., 2019)

Desta maneira, fica evidente que arborizar uma cidade não é simplesmente plantar árvores nas ruas, é usufruir conscientemente e de maneira inteligente dos seus benefícios (LAURETT; RIBEIRO; CLEMES; 2016). Para a escolha da espécie deve-se considerar o

porte da árvore quando adulta, a projeção da copa com base em sua arquitetura, a distribuição e o aprofundamento do sistema radicular e lembrar que árvores no ambiente urbano têm comportamento diferente do esperado em seu habitat natural, desta maneira deve-se levar em conta sua adaptação ao meio antropizado (LEITÃO, 2016).

A utilização de espécies inadequadas para a arborização de uma cidade pode oferecer riscos e prejuízos para a sociedade, por isso um planejamento da escolha de espécies arbóreas é fundamental para que se aproveitem os benefícios que esses vegetais têm a oferecer (DORIGON; PAGLIARI, 2013). Um meio de maximizar os benefícios da arborização é minimizar os danos, valorizando desta maneira os investimentos nesse patrimônio público (ZAMPRONI et al., 2018).

### 2.1.3 Espécies mais comuns na arborização

É comum encontrarmos as mesmas espécies disseminadas pela arborização do país, existindo pouca variação entre as regiões. Segundo Ribeiro (2009) o uso dessas mesmas espécies em diferentes partes do Brasil relaciona-se com o fato de que, em muitos casos, existia a desinformação sobre a adequação de espécies ao ambiente urbano. A escolha sem o devido critério acarretou, muitas vezes, na utilização de espécimes arbóreos incompatíveis ao meio, gerando conflitos com os equipamentos urbanos.

Em estudo sobre o diagnóstico florístico da arborização urbana no Brasil realizado por Pereira (2015) foram identificadas as espécies utilizadas na arborização viária de 93 cidades brasileiras. Dentre as espécies citadas encontram-se *Caesalpinia pluviosa* (DC.) e *Licania tomentosa* (Benth) Fritsch como de maior relevância a nível nacional. *Caesalpinia pluviosa* foi mais representativa na região Sul e esteve presente também nas regiões Norte, Sudeste e Centro-oeste do país. Já *Licania tomentosa* (Benth) Fritsch, esteve presente em todas as regiões do Brasil, com predomínio nas regiões Centro-oeste, Sudeste e Norte (PEREIRA, 2015). Outras espécies que compõe a lista das mais frequentes do Brasil, apontadas por este estudo foram: *Lagerstroemia speciosa*, *Handroanthus impetiginosus* e *Spathodea campanulata* (PEREIRA, 2015).

*Lagerstroemia speciosa* e *Spathodea campanulata* foram apontadas como as espécies de origem exóticas mais utilizadas na arborização urbana no Brasil (FERNANDES et al., 2014). Além destas, *Delonix Regia* (Bojerex. Hook.). Raf. também é muito frequente, pois foi

uma das primeiras espécies exóticas inicialmente introduzidas na floresta urbana do Brasil (LORENZI et al., 2003).

No estado de Minas Gerais, um estudo analisou a composição florística da arborização viária em 35 cidades e encontrou dentre as espécies arbóreas mais comuns: *Licania tomentosa* (Oitizeiro), *Ceiba speciosa* (Paineira), *Spathodea campanulata* (Espatódea), *Delonix regia* (Flamboyant), *Caesalpinia peltophoroides* (Sibipiruna), *Lagerstroemia speciosa* (Escumilha), *Handroanthus serratifolius* (Ipê-amarelo), *Handroanthus impetiginosus* (Ipê-roxo) e *Libidibia ferrea* (Pau-ferro). Estas mesmas espécies foram encontradas em outro diagnóstico quali-quantitativo da arborização urbana realizado em cinco cidades na região sul do estado de Minas Gerais (FERNANDES et al., 2014).

## 2.2 PANORAMA GERAL SOBRE A ESTABILIDADE ESTRUTURAL DAS ÁRVORES URBANAS

As árvores precisam de um manejo cuidadoso em áreas urbanas, pois a queda de parte ou de toda sua estrutura pode resultar em acidentes e danos às pessoas, propriedades e demais estruturas (JAMES; HARITOS; ADES, 2006). Desta forma, a queda de árvores é um problema grave que ocorre em várias cidades no mundo, seja por consequência da idade avançada dos indivíduos, ou por outros fatores locais, como poluição que afeta as condições fitossanitárias da planta, chuvas fortes e vendavais, podas irregulares e raiz instável (SAMPAIO et al., 2010; PEREIRA et al., 2011).

No Brasil, perdas humanas e/ou materiais causadas pela queda de árvores após vendavais e tempestades são ocorrências frequentes (PEREIRA et al., 2011). Na cidade de São Paulo - SP registrou-se mais de duas mil quedas de árvores urbanas somente nos meses de janeiro e fevereiro de 2019 (APPLE, 2019), tendo a prefeitura gasto cerca de 200 mil reais com indenizações a proprietários de veículos atingidos (RIBEIRO, 2019).

Em Belo Horizonte - MG, em 2018, foram suprimidas mais de 10 mil árvores em risco de queda, sendo investidos cerca de 15 milhões de reais para podas e remoções (RONAN, 2018). No município de Viçosa, após passagem de um temporal com ventos de até 82km/h, em outubro de 2019, foram registradas queda de aproximadamente 190 árvores no *campus* da Universidade Federal de Viçosa (GUIMARÃES; DELGADO, 2019).

Notícias como estas se tornaram recorrentes nas grandes cidades nos últimos anos e a problemática encontrada entorno disso é que há um descaso com a arborização por parte dos

gestores. Isso porque as árvores não caem apenas quando estão mortas ou doentes, mas por se encontrarem em condições inadequadas para o seu desenvolvimento, reflexo de um planejamento inadequado e uma manutenção ineficiente. Ambas as ações acabam por interferir nas condições de estabilidade e ancoragem das árvores, influenciadas pela condição biomecânica, que interfere no entendimento do risco de queda.

### **2.2.1 Ancoragem**

A raiz é responsável não só pela fixação da planta ao solo, mas desempenha outras funções, como a absorção de água e nutrientes, a condução desses elementos para o restante da planta e o armazenamento das substâncias não necessárias de imediato para posterior consumo (PEREIRA, 2017). Assim, dentre as funções desempenhadas pela raiz, a responsável pela fixação da planta ao solo é denominada de ancoragem.

A ancoragem é feita pelas raízes mais grossas e lignificadas da planta, a partir dos nós mais próximos ao nível do solo e, a compreensão da forma como ocorre esse processo pode ajudar a evitar o desenraizamento da árvore quando submetidas a certas adversidades (DUPUT et al., 2007).

A força da ancoragem das raízes tem influência de diversos fatores, dentre eles arquitetura da raiz, profundidade, propriedades físicas e analíticas do solo, forma e peso da placa radicular e a localização do eixo rotacional durante a queda da árvore (RAHARDJO et al., 2014).

Devido às condições que o ambiente urbano oferece ao desenvolvimento das árvores, a maioria desenvolve sistemas radiculares superficiais, sendo que este tipo de arquitetura de raiz, frequentemente, é menos eficaz em suportar rajadas de ventos e possui uma ancoragem menos efetiva (RAHARDJO et al., 2016). *Plate root*, ou raiz rasa é a arquitetura de raiz mais fraca em suportar a derrubada e, portanto, a mais crítica para a estabilidade de árvores (RAHARDJO et al., 2014).

Diferenças na formação de raízes, devido à exposição da árvore ao vento, foram pesquisadas por Cucchi et al. (2004), em pinheiros escoceses. Neste estudo foi observado que as árvores situadas nas bordas do plantio sofreram atuação muito mais intensa do vento do que as árvores internas do plantio, o que ocasionou em mudanças no crescimento das raízes, melhorando a força de ancoragem das árvores mais expostas aos ventos.

Outras pesquisas demonstraram que solos mal drenados aumentam a suscetibilidade das árvores ao desenraizamento, pois oferecem uma combinação de redução de força como resultado da deterioração das raízes e um aumento no estresse de tração devido ao desenvolvimento de pressão de água nos poros (RAHARDJO et al., 2016). Em solos bem drenados o desenvolvimento do sistema radicular é bem maior quando comparado com solos saturados e rasos, aumentando a ancoragem das árvores (DA MATA ATAÍDE et al., 2015).

Os testes mais utilizados para análise da força de ancoragem de árvores são testes de guinchos estáticos (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013a). Segundo Lundstrom, Jonsson e Kalberer (2007) a força de ancoragem é o valor máximo de carga durante o teste estático, medido pelo momento de giro máximo na base arbórea. Nestes testes as árvores são puxadas lateralmente até a falha, registrando a força máxima necessária para tal, no entanto, os testes estáticos são dispendiosos, destrutivos e o número de árvores extraídas para o estudo é frequentemente limitado (RAHARDJO et al., 2014).

Para entender sobre o processo de falhas de ancoragem das árvores, é necessário medir precisamente o ângulo de rotação da placa de raízes da árvore, alterado pela influência do vento (STOKES, 1999). Contudo, é importante destacar que investigar a ancoragem de árvores adultas é complicado devido à complexidade morfológica encontrada no seu sistema de enraizamento (DUPUT et al., 2007).

### **2.2.2 Estabilidade**

A estabilidade mecânica de uma árvore é a capacidade de suportar as forças do vento que ocorrem durante toda a sua vida (JAMES; HARITOS; ADES, 2006). O que requer atenção especial, principalmente no que diz respeito à parte mecânica, pois inúmeros danos às pessoas e propriedades podem ser provocados pela queda das árvores ou de seus galhos (GHANI; STOKES; FOURCAUD; 2009).

Allison e Wang (2015) afirmam que as árvores são organismos que reagem prontamente a qualquer estresse ambiental, estando constantemente sob algum tipo de esforço mecânico, desde suportar seu próprio peso, até as respostas diárias de inclinações geradas pelo vento. Assim, quando uma força horizontal atinge a árvore uma força resultante igual e oposta é produzida, tendendo a arrancar a árvore do solo, a menos que haja uma força recíproca capaz de manter a estabilidade. Da mesma forma, quando ocorre uma força vertical, a carga de vento na copa é redirecionada para baixo, em direção ao tronco e ao sistema radicular.

Ainda segundo os autores, para que as tensões mecânicas possam ser suportadas pelas raízes, é necessário resistir à força de cisalhamento e, para manter-se no local, a árvore precisa desse equilíbrio de contrapesos contínuo.

A força, a forma, o tamanho, a orientação da arquitetura das raízes, e a placa de raízes (área ao redor da base da árvore), são responsáveis pela estabilidade estrutural de uma árvore e da sua resistência à queda, além de outros fatores, como as propriedades físicas do solo no qual a árvore está inserida, o tamanho das árvores, sua forma e estrutura (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013a).

Para Schubert et al. (2009) os principais aspectos que determinam a estabilidade de uma árvore são: o diâmetro do tronco; a carga do vento; a resistência da madeira; a ancoragem da raiz; e a localização e geometria da decomposição fúngica ou cavidade que pode existir no interior do tronco (SCHUBERT et al., 2009). Já para Rahardjo et al. (2014) as propriedades da raiz, como a área de seção transversal e o raio da placa de raízes, são os fatores cruciais na estabilidade das árvores.

Vários métodos já foram desenvolvidos para avaliar a estabilidade das árvores. Dentre eles estão: modelagem em florestas, aplicação de carga estática por tração e avaliação visual principalmente em áreas urbanas (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013b).

Testes estáticos tiveram um papel importante no fornecimento de informações sobre a estabilidade de árvores quando em condições naturais de vento, mas esta mesma simulação da carga estática por tração de árvores (arraste com maquinário) pode não representar com precisão as forças dinâmicas reais impostas às árvores e sistemas radiculares (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013a; MULLANEY; LUCKE; TRUEMAN; 2015). Isto porque, diversas variáveis, como por exemplo, arquitetura das raízes, propriedades do solo e lençol freático podem influenciar nesta estabilidade, confundindo os resultados encontrados nos testes. Além disso, a estabilidade mecânica e a segurança das árvores são diretamente afetadas pela ancoragem das raízes (LUNDSTRÖM; JONSSON; KALBERER; 2007), variável, esta, difícil de ser analisada.

Os estudos sobre os efeitos das cargas exercidas por elementos naturais, como ventos e chuvas, sobre as árvores pode fornecer uma base melhor para gerar modelos simplificados de cálculo para previsão dos perigos e riscos associados a determinado evento (FERREIRA, 2017). No entanto, segundo o mesmo autor, tais análises detalhadas da estabilidade da estrutura da árvore em que se consideram todas as variáveis em conjunto ainda não são usuais.

### 2.2.3 Biomecânica das árvores

Talvez devido ao tamanho e importância ecológica, nenhum hábito de crescimento de plantas tenha recebido mais atenção do que o das espécies arbóreas. Durante muito tempo os trabalhos que abordaram o “design” mecânico das árvores se concentraram em como elas sustentavam seu próprio peso e quais fatores físicos limitavam sua altura e, apenas posteriormente, buscou-se a compreensão dos efeitos da carga dinâmica do vento na estabilidade mecânica de caules frondosos e raízes de ancoragem (NIKLAS et al., 2006).

De acordo com Spatz e Bruechert (2000), o crescimento das árvores é determinado, em grande parte, por restrições fisiológicas, como as que afetam a fotossíntese e o transporte de água. Entretanto, se estas forem ideais, o limite de altura e formadas árvores também pode ser imposto por restrições biomecânicas. Momentos de flexão nos galhos e troncos podem ser induzidos por cargas gravitacionais, ou seja, pelo próprio peso da árvore ou por cargas adicionais, como cargas de vento.

A atuação dessas cargas adicionais faz com que o caule tenha que se sustentar e organizar sua copa de forma eficaz sob a influência da gravidade, principalmente em dias de vento e em condições de chuva (Noguchi e Terashima, 2006). Sendo assim, as plantas são frequentemente estruturadas de tal forma que, ao flexionar, se aproximam de seus limites biomecânicos dentro de margens de segurança controladas, como cargas gravitacionais ou de vento normais e pode ser anulado por cargas excessivas como de ventos extremos (Spatz e Bruechert, 2000).

Para as árvores suportarem os esforços advindos do ambiente, devem apresentar fatores de segurança confiáveis mecanicamente, em seu sistema radicular, tronco e copa (Brazolin, 2009). Para isso ocorrer são necessárias modificações das propriedades mecânicas das árvores, criando tensões internas e otimizando sua forma e estrutura por meio do crescimento adaptativo, a fim de manter um estado de tensão mecânica constante, evitando a ruptura (Mattheck e Vorberg, 1991; Noguchi e Terashima, 2006).

Os principais mecanismos de otimização das árvores foram organizados por Mattheck e Kubler (1995) apud Brazolin (2009) em cinco teoremas:

Axioma de tensão uniforme: as árvores crescem mantendo uma tensão uniforme por toda sua estrutura. Quando há interferência por agressão biótica ou abiótica a planta tende a restabelecer o equilíbrio com a deposição de material reparador.

Princípio da mínima alavanca: a árvore ameniza as interações externas proporcionando um mínimo comprimento da alavanca de galhos ou troncos. Pode ocorrer de maneira ativa, em que os galhos e troncos têm um ângulo/encurvamento maior, e de maneira passiva, em que as partes flexíveis das plantas respondem às cargas dinâmicas do vento.

Paralelismo de fibras e distribuição de tensões: como uma estrutura otimizada, os anéis de crescimento, fibras e traqueídeos são organizados no sentido das forças longitudinais ou tangenciais solicitantes buscando reduzir as tensões de cisalhamento.

Anéis de crescimento e distribuição de tensões: Adaptação da direção e arranjo dos anéis de crescimento ao grau e tipo de esforço externo, buscando assim, aumentar a resistência do lenho.

Tensão de crescimento: pontos de fraqueza no lenho são contrabalançados por deposições consecutivas de novas camadas de células a partir do câmbio. Essas novas células tendem à expansão lateral enquanto, ao mesmo tempo, se contraem no sentido longitudinal. A ação dessas forças internas atua sobre os tecidos das árvores, de forma a mantê-las íntegras e eretas se contrapondo aos esforços críticos.

O carregamento mecânico influencia fundamentalmente o desenvolvimento da forma externa da árvore, havendo a relação entre esses vários mecanismos de otimização com a formação de tecidos na parte externa do indivíduo arbóreo (NOGUCHI; TERASHIMA, 2006). Esse desenvolvimento de tecido surge para compensar os esforços solicitantes, alguns exemplos são espessamentos no colo e no tronco, calos, cicatrizes (BRAZOLIN, 2009).

A rigidez da madeira é outro aspecto de grande importância nos estudos da biomecânica, pois é responsável pela resposta da mesma às deformações e rupturas de galhos, troncos e raízes quando submetidos às forças do vento, precipitação e do próprio peso (GONÇALVES et al., 2019). No entanto, ainda segundo os autores, um impedimento ao desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos estudos da biomecânica é a falta de informações sobre as propriedades mecânicas da madeira verde e da maioria das espécies utilizadas na arborização urbana.

## 2.3 PRINCIPAIS FATORES QUE INTERFEREM NA ESTABILIDADE DAS ÁRVORES

### 2.3.1 Agentes naturais

Os fatores naturais que provocam maior interferência na estabilidade das árvores são os ventos e as tempestades. O vento pode ser definido como o deslocamento horizontal de uma massa de ar que ocorre em consequência da transferência de ar das zonas de maior pressão para as de menor pressão e é especificado por dois fatores: a velocidade e a direção (DA MATA ATAÍDE et al., 2015).

A maior carga, dentre as forças naturais a que uma árvore é submetida, é causada pelo vento que pode vir como rajadas de eventos rápidos, periódicos e dinâmicos (JAMES; HARITOS; ADES, 2006). Em resposta aos ventos que incidem horizontalmente, as árvores balançam dinamicamente em consequência da combinação de torques por torção e flexão em sua base, podendo ocorrer a derrubada deste exemplar em situações onde o torque ultrapassa a resistência do sistema de enraizamento da árvore (DA MATA ATAÍDE et al., 2015). James, Hallam e Spencer (2013a) também afirma que a falha da árvore, sob ação do vento, ocorre quando esta inclina além do seu limite estabelecido pelo ângulo de rotação.

Os danos às árvores causados por ventos fortes vão desde o desfolhamento, quebra de galhos até a derrubada de toda a árvore (ROSADO et al., 2013). Assim, para resistir, os sistemas radiculares das árvores devem ser grandes o suficiente para transferir essas forças externas para o solo e rígidos o suficiente para evitar a ruptura (STOKES, 1999). Da Mata Ataíde et al. (2015) relatou que a interação entre as propriedades físicas do solo são determinantes para o risco de derrubada da árvore pelo impacto e força dos ventos, assim como a precipitação.

Diversos fatores influenciam na resistência da árvore aos ventos fortes, dentre eles a idade, altura, densidade da copa, diâmetro do fuste, densidade da madeira, arquitetura do sistema radicular, dimensão da copa, dentre outros (OLIVEIRA; LOPES, 2007; ROSADO et al., 2013). Sendo que as árvores mais afetadas pela ação do vento são as que estão mais expostas à frequência, velocidade, intensidade e turbulência das correntes de ar (DA MATA ATAÍDE et al., 2015).

Árvores maiores, por terem copas maiores e uma altura de copa maior, têm um momento de giro, a uma determinada força de vento, maior que árvores menores com altura de copa menores (HALE et al., 2012). Além disso, como a estabilidade mecânica de uma

árvore está relacionada com sua capacidade de suportar as forças do vento que ocorrem durante toda a sua vida, as árvores maiores, quando em áreas expostas, devem suportar as maiores forças (JAMES; HARITOS; ADES, 2006).

Nas árvores situadas em povoamentos florestais, os efeitos dinâmicos da copa são menos importantes do que em árvores situadas em zonas abertas, que em geral possuem grandes copas, fazendo com que a oscilação de muitos galhos grandes e independentes seja muito mais complexa sob atuação dos ventos (JAMES et al., 2006). O movimento dinâmico da copa amortece a carga de vento, que é propagada em menor escala para o fuste, através da movimentação complexa dos galhos. Por esta razão, o estudo da carga de vento tem sido visto com grande importância para o manejo das árvores urbanas.

Outro agente natural com interferência significativa na estabilidade são as tempestades. Isto ocorre devido ao processo de interceptação da água da chuva, onde temporariamente uma parte é retida pela copa, outra escorrega pelo tronco e outra é evaporada para atmosfera (ARCOVA; CICCIO; ROCHA, 2003). Assim, esse acúmulo existente sobre a copa, galhos e troncos, exerce maior peso, interferindo na estabilidade.

Três fatores podem influenciar nessa quantidade de água interceptada e, por consequência, acumulada: o tipo de evento de chuva (intensidade e duração); a estrutura da copa e as condições meteorológicas (CROCKFORD; RICHARDSON; 2000). Xiao et al. (2007) cita ainda outros fatores, como: permanência das folhas, arquitetura da árvore, tamanho, tipo e número de folhas, temperatura, umidade relativa, velocidade dos ventos e radiação solar. Em pesquisas realizadas na França, os autores constataram uma redução da força de ancoragem das árvores com a intensidade da tempestade (DUPONT et al., 2018). Além do peso exercido pela água, outro fator que pode ter relação com tal situação é que as chuvas torrenciais podem saturar os solos, reduzindo a sua capacidade de manter as raízes, mesmo que estas estejam saudáveis (JAMES; HALLAM; SPENCER; 2013b). De qualquer forma, esta relação entre tempestades e a estabilidade das árvores ainda é pouco compreendida, sendo irrisória se comparada à ação dos ventos.

### **2.3.2 Ações de implantação e manejo da arborização**

A escolha de um local ideal para o plantio, a nutrição e o manejo adequado são cuidados indispensáveis ao bom estabelecimento das árvores urbanas, pois interfere diretamente no vigor e sanidade destas árvores, diminuindo a susceptibilidade dos indivíduos

arbóreos ao ataque de pragas e doenças, permitindo um desenvolvimento melhor das raízes e da parte aérea da planta, além de minimizar os riscos de queda (PEREIRA, 2017).

Árvores que crescem em ambientes construídos muitas vezes têm espaços restritos para o seu cultivo, são plantadas em condições de solo não ideais, resultando em sistemas radiculares rasos e/ou deformados, prejudicando o desenvolvimento e comprometendo sua ancoragem e equilíbrio (GHANI; STOKES; FOURCAUD; 2009).

Em pesquisa realizada em Piracicaba – SP foi observado um número maior de queda de árvores no centro da cidade, que pode ser explicada pelas condições estressantes que as árvores encontram nos centros urbanos, como plantios em solos compactados, com canteiros estreitos onde não há espaço para um bom desenvolvimento do sistema radicular, comprometendo a sustentação dessas árvores (MENDES; POLIZEL; DA SILVA FILHO; 2016).

A definição real da quantidade de volume de solo por árvore é uma tarefa altamente complexa. Pesquisa desenvolvida por Lindsey e Bassuk (1991), aponta para uma estimativa de 0,06m<sup>3</sup> de solo para cada 0,09m<sup>2</sup> de projeção da copa. Contudo, os autores destacam que isso varia muito conforme as estratégias de uso de água pelas espécies, a heterogeneidade das características do solo e as peculiaridades do microclima local.

É importante destacar que isso não se refere ao tamanho de abertura da cova, mas sim, a área total necessária para que a árvore possa se desenvolver. Sabe-se, desta forma, que volumes limitados, podem confinar raízes, restringir o crescimento, reduzir a ancoragem e fornecer quantidade inadequada de umidade e nutrientes (OLIVEIRA; LOPES, 2007). Pesquisas demonstram que a taxa de desenvolvimento de árvores que crescem em parques e florestas ou até mesmo em gramados abertos é maior do que as de árvores plantadas em canteiros restritos, envoltos por material impermeável, pois estes afetam o acesso das raízes à água, ao ar, aos nutrientes, comprometendo o desenvolvimento das árvores urbanas (MULLANEY; LUCKE; TRUEMAN; 2015b).

Além da atenção no processo de implantação, cuidados com o manejo também são importantes, principalmente referentes à poda. A solução encontrada nas cidades para o conflito de árvores com a rede elétrica são as podas periódicas, contudo, muitas vezes estas são realizadas de maneira severa e sem critérios técnicos, o que acaba comprometendo a sanidade e promovendo o desequilíbrio do vegetal (DORIGON; PAGLIARI, 2013).

Segundo Rossetti, Pellegrino e Tavares (2010), no município de São Paulo realizou-se durante bastante tempo poda de destopo visando minar conflitos de árvores de grande porte

com a rede elétrica. Neste tipo de poda a árvore esgota sua reserva de energia investindo num processo intensivo de rebrota que acarreta no atrofiamento da raiz e conseqüentemente, devido ao desequilíbrio entre a relação da massa da copa e do sistema radicular, resulta na queda do vegetal. E em situações onde as árvores se recompõem, elas assumem características de copa diferentes de sua arquitetura original, resultando em copas descaracterizadas e que comprometem a estética. Em outro estudo, realizado por Martins, De Andrade e De Angelis (2010) também foi observado que podas drásticas, favorecem o desenvolvimento das brotações epicórmicas, desestabilizando a copa da árvore e deixando-as vulneráveis a queda.

Destaca-se ainda, que as demandas por poda ocorrem não para o benefício do vegetal, mas para satisfazer as necessidades humanas. Estas são realizadas com o objetivo de compatibilizar a árvore ao espaço físico disponível e dependendo da intensidade, do tipo e da experiência de quem a prática pode acarretar sérios danos à árvore (GROHMANN et al., 2019). Contudo, ressalta-se que o plantio de espécies arbóreas de grande porte sob a rede elétrica compacta isolada é possível, por meio da poda de condução bem executada, em que a fiação passa entre a copa onde não há presença de galhos (ROSSETTI; PELLEGRINO; TAVARES, 2010).

A poda realizada sem critérios técnicos pode comprometer a sanidade das árvores. Pode acarretar um desequilíbrio e conseqüente perda de raízes finas, comprometendo a absorção de água e nutrientes do solo e interferindo no equilíbrio da árvore (SANTOS et al., 2015). Uma remoção inadequada de um galho, por exemplo, pode deixar o lenho da árvore exposto permitindo a entrada de patógenos responsáveis pela biodeteriorização do lenho (MARTINS; DE ANDRADE; DE ANGELIS; 2010). Podas intensas, devido a conflitos com a rede aérea acarretam no apodrecimento de algumas raízes, servindo de abrigo e fonte de alimento para fungos, comprometendo a estabilidade dessas árvores (PEREIRA et al., 2017). Todavia, quando realizada corretamente a poda evita grandes danos às árvores urbanas e, não necessariamente deve ser abolida (VELASCO; LIMA; COUTO; 2006).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O município de Viçosa está localizado na região sudeste do Brasil, na Zona da Mata Mineira, a 650 m de altitude, na latitude 20° 45' 23" Sul e longitude 42° 52' 23" Oeste. Faz divisa geográfica com os municípios de Teixeira, Guaraciaba, Paula Cândido, Coimbra, Cajuri, São Miguel do Anta e Porto Firme (IBGE, 2019).

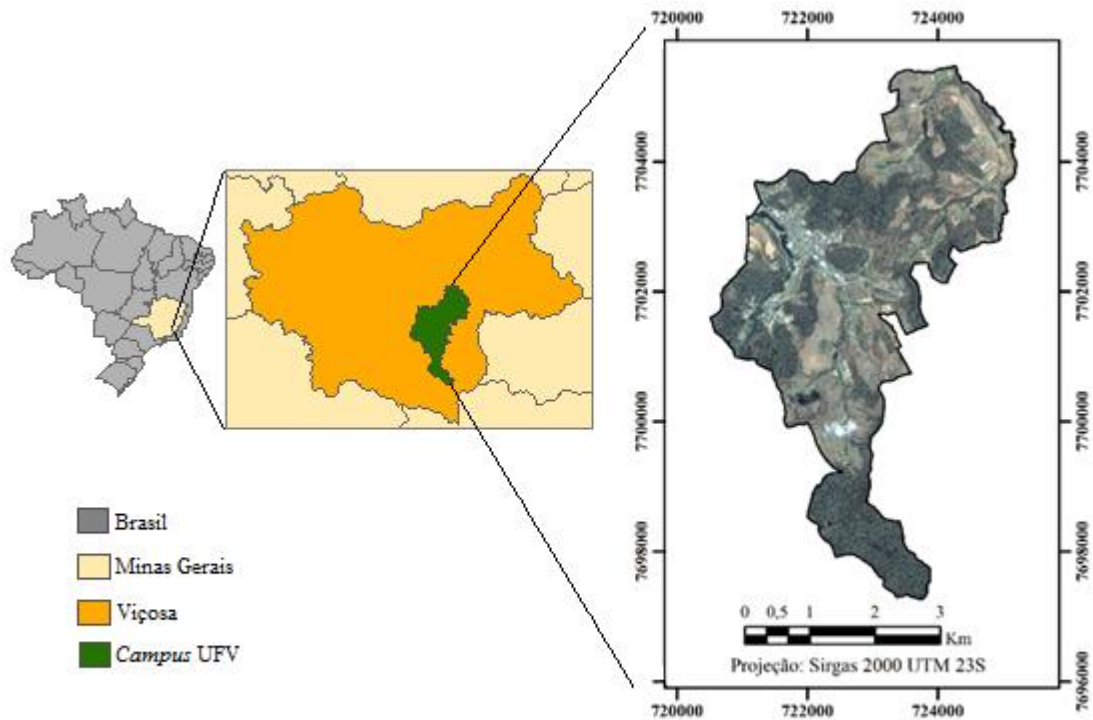
A cidade apresenta área total de 299,418 km<sup>2</sup> e segundo o IBGE para o ano de 2019, a população é estimada em 78.846 habitantes, com densidade demográfica de 241,20 hab/km<sup>2</sup> e 85% da população residindo em área urbana.

O clima é do tipo Cwa, clima subtropical úmido com invernos secos (Koppen), mesotérmico, com temperaturas anuais média, máxima e mínima de 19, 26,1 e 14 °C, respectivamente. A precipitação média anual é de 1.314,2 mm, apresentando déficit hídrico no período de maio a setembro e um excedente entre dezembro e março (SOARES JÚNIOR, 2000). A direção predominante dos ventos para a cidade de Viçosa é Nordeste, seguida da direção Norte (INMET, 2019).

A topografia é acidentada com vales estreitos e úmidos, os solos da região têm predominância de latossolos no topo e nas encostas das elevações e, argissolo vermelho-amarelo nos terraços. O município se enquadra no bioma Mata Atlântica, na região fitogeográfica denominada de Floresta Estacional Semidecidual, no qual ocorre repouso fisiológico e queda parcial da folhagem durante os períodos de inverno (IBGE, 2012). Não há registros sobre a arborização que compõem o município, mas aproximadamente 45,1% das casas estão em ruas arborizadas (IBGE, 2019).

Parte da porção central do município é ocupada pelo *campus* sede da Universidade Federal de Viçosa (UFV), inaugurado em 1926 (Figura 1). O *campus* tem fundamental importância para a população local, que se estabeleceu e desenvolveu no seu entorno, fazendo com que se mantivesse em local privilegiado no município.

Figura 1 - Mapa de localização do *campus* da UFV, bem como o município de Viçosa e o estado de Minas Gerais



Fonte: A autora (2019)

Muitas universidades brasileiras apresentam em seus *campi* universitários áreas arborizadas com diferentes espécies e composições paisagísticas (LEAL; PEDROSA-MACEDO; BIONDI, 2009) responsáveis por desempenhar uma função social expressiva. Para Viçosa, a importância do *campus* da UFV é indiscutível, visto que a cidade não apresenta parques ou áreas verdes adequadas para a prática de atividades de recreação, lazer e esportes (BRIANEZI et al., 2013). Assim, além de proporcionar espaço para essas atividades, o que lhe confere tamanha importância para os municípios, deve-se destacar que o *campus* serve ainda como laboratório de pesquisa na área de arborização, devido à expressiva quantidade de árvores existentes.

De modo geral, os *campi* das grandes universidades brasileiras já apresentam reconhecido potencial para a realização de pesquisas na área de arborização urbana e paisagismo, devido à motivação intelectual inerente ao meio acadêmico, aliada ao espaço urbano peculiar dessas instituições (CUPERTINO; EISENLOHR, 2013). Além de apresentarem todas as características físicas e estruturais de uma cidade em uma escala menor (LEAL; PEDROSA-MACEDO; BIONDI, 2009).

A arborização do *campus* da UFV caracteriza-se pelo predomínio de espécies nativas em relação às exóticas, possui grande variedade de espécies arbóreas, porém, com baixa heterogeneidade (BRIANEZI et al., 2013). Atualmente é composta por 4.442 indivíduos arbóreos de 124 espécies, com destaque em expressividade para *Licania tomentosa*, *Michelia champaca*, *Caesalpinia peltophoroides*, *Murraya paniculata*, *Bauhinia forficata*, *Lagerstroemia indica*, *Spathodea campanulata*, entre outras (SILVA, 2019).

## 3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

### 3.2.1 Seleção dos exemplares arbóreos

Nove espécies de árvores comumente utilizadas na arborização urbana foram analisadas: *Licania tomentosa* (Oitizeiro), *Ceiba speciosa* (Paineira), *Spathodea campanulata* (Espatódea), *Delonix regia* (Flamboyant), *Caesalpinia peltophoroides* (Sibipiruna), *Lagerstroemia speciosa* (Escumilha), *Handroanthus serratifolius* (Ipê-amarelo), *Handroanthus impetiginosus* (Ipê-roxo) e *Libidibia ferrea* (Pau-ferro). Destaca-se que estas espécies estão entre as mais frequentes no *campus* da Universidade Federal de Viçosa (SILVA, 2019), excluindo aquelas de pequeno porte, palmáceas ou as que não se tem informações sobre ocorrência de queda.

A seleção dos indivíduos arbóreos foi realizada de acordo com as seguintes prioridades: proximidade entre os exemplares, condições físicas adequadas (sem injúrias aparentes nas raízes e troncos), ausência de tortuosidade do tronco, boa condição fitossanitária (ausência aparente de pragas e doenças), semelhança nos valores de diâmetro na altura do peito (DAP), semelhança nas características ambientais do entorno e semelhança nos valores de altura total.

Para a análise do comportamento das espécies em condições ideais, foram selecionados três indivíduos de cada espécie, totalizando 27 árvores. Foi considerada como condição ideal os locais onde as árvores possuíam espaço aéreo e subterrâneo livres de obstáculos. Sem interferência de equipamentos urbanos e outras árvores, garantindo o pleno desenvolvimento de sua copa e raiz. Como critério de seleção, foi exigido que a árvore estivesse plantada em uma área de canteiro igual ou superior ao tamanho de projeção da sua copa (Figura 2).

Figura 2 - Árvores em condição ideal de plantio (com espaço suficiente para o pleno desenvolvimento de sua copa e raiz)



Fonte: A autora (2019)

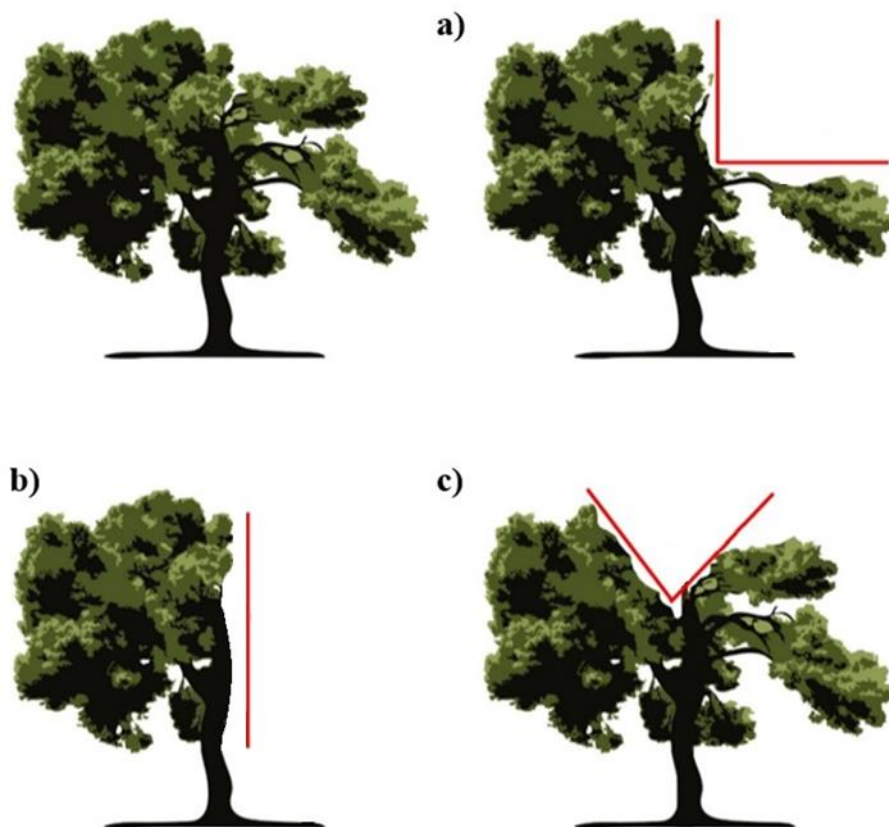
A análise da influência do tipo de poda no comportamento das árvores foi realizada em indivíduos das espécies: *Caesalpinia peltophoroides*, *Delonix regia* e *Licania tomentosa*. Cada espécie contou com três repetições em cada tipo de poda, exceto os indivíduos de *Caesalpinia peltophoroides* em que não foi possível encontrar mais de um indivíduo por tipo de poda em condições satisfatórias para essa avaliação. Esta análise contou, portanto com 28 árvores. Os tipos de poda receberam denominações conforme popularmente são conhecidas, devido ao aspecto visual apresentado, no entanto, tecnicamente, todos esses tipos de poda são denominados como poda direcional. Os tipos de poda foram:

- a. poda em L – retirada seletiva de quase 50% da copa da árvore em apenas um lado, restando apenas alguns galhos na parte inferior, configurando um “L”;

- b. poda unilateral – remoção de 50% da copa em um único lado, no qual a copa restante se concentra somente no lado oposto;
- c. poda em V – poda direcional que consiste no corte dos galhos do centro da copa, evidenciando os galhos laterais, configurando um “V”.

Para verificar a influência desses tipos de poda na ancoragem das árvores, estas foram comparadas com indivíduos da mesma espécie classificados como de copa natural, que consiste em exemplares caracterizados por manter a arquitetura de copa característica da espécie (Figura 3). Além disso, a garantia de condições semelhantes de canteiro entre eles foi um critério de seleção.

Figura 3 - Diferentes tipos de podas de desobstrução: poda em L, poda unilateral e poda em V



NOTA: Primeira árvore – árvore com copa natural / sem intervenção aparente de poda; a) poda em L; b) poda unilateral c) poda em V. Fonte: A autora (2018).

A análise da condição de canteiro buscou comparar o comportamento das árvores em condições ideais com situações mais restritivas de espaço para o enraizamento. A condição ideal, para este caso, foi aquela onde havia área livre de pavimentação ao redor da base da

árvore, com área de canteiro igual ou superior a projeção da copa. Já as situações mais restritivas foram:

- a. canteiro restrito – área pavimentada ao redor de toda a árvore ou com até 0,50 m<sup>2</sup> de área permeável;
- b. canteiro intermediário – maior área livre de pavimentação ao redor da árvore do que as de canteiro restrito, compõe essa amostragem, indivíduos plantados em canteiros com tamanhos entre 4,50 m<sup>2</sup> e 20,50 m<sup>2</sup>. Em que a maioria dos canteiros apresenta tamanho aproximado de 10 m<sup>2</sup>.

A coleta de dados foi realizada simultaneamente entre a condição de canteiro restrito e a condição ideal da mesma espécie, bem como o canteiro intermediário com o ideal (Figura 4).

Figura 4 - Árvores em diferentes condições de canteiro: canteiro restrito e canteiro intermediário



NOTA: 1 – Canteiro restrito; 2 – Canteiro intermediário. Fonte: A autora (2019)

Para análise em canteiro restrito foram selecionados 24 indivíduos de cinco espécies. Foram formados pares de canteiro restrito e condição ideal para todas as espécies. Para as espécies *Licania tomentosa*, *Lagerstroemia speciosa* e *Spathodea campanulata* foram

analisados três pares. Já para a espécie *Handroanthus serratifolius* foram encontrados apenas dois pares possíveis e para *Caesalpinia peltophoroides*, um. Desta mesma maneira, em canteiro intermediário, foram analisados outros 24 indivíduos das espécies *Caesalpinia peltophoroides*, *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa*, *Lagerstroemia speciosa*, *Delonix regia* e *Ceiba speciosa*. Para as três últimas espécies, ao invés de três, só foi possível encontrar um par adequado.

Após a seleção, os indivíduos e o seu entorno foram devidamente caracterizados, para isso foram coletadas as seguintes informações: altura da árvore, estimada com auxílio de uma vara retrátil; diâmetro na altura do peito (DAP), medido com fita métrica a 1,30 m do solo; diâmetro de copa, também medido com uma trena, tendo como base a projeção da copa ao solo, no qual se obteve duas medidas perpendiculares de diâmetro e em situações de podas obtiveram-se quatro valores de raios; altura do início da copa, referente a distância entre o solo e a parte baixa da copa, com uso da vara retrátil; e dimensões dos canteiros onde as árvores estavam plantadas, medidos com trena.

### **3.2.2 Coleta de dados para a inclinação da placa de raiz**

A definição do período de coleta de dados em campo para mensurar a inclinação da placa de raiz se deu a partir de uma análise dos dados de velocidade de vento, obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil (INMET). Os valores diários de velocidade do vento registrados pela estação convencional nos últimos três anos que antecederam a realização da pesquisa foram utilizados para definir os meses de maior incidência. Este procedimento, no entanto, precisou ser alterado devido à inconsistência de dados armazenados na estação oficial convencional entre os anos de 2016 a 2018. Desta forma, o período mais recente disponível para a análise foi entre 2012 e 2015. Por meio desta análise verificou-se que o período de maior incidência de ventos ocorre em Viçosa entre os meses de dezembro a março. Já a definição do horário para a realização da coleta foi possível com base na análise dos dados horários registrados pela estação automática do INMET, no último ano que antecedeu o início da pesquisa (2018). Estes sem presença de inconsistência. Com base nesta análise foi possível identificar que o período do dia com maior incidência de vento ocorre majoritariamente na parte da tarde, entre 13 e 17 horas.

Deste modo, com base nas análises prévias descritas, a coleta de dados em campo para mensurar a inclinação da placa de raízes foi realizada entre os meses de fevereiro e março de

2019, entre 13 e 17 horas. A previsão do tempo fornecida pela *The Weather Company* foi consultada diariamente para evitar a realização da coleta de dados em dias com baixa disponibilidade de vento. Mesmo assim, por se tratar de uma previsão, não foi garantida previamente a ocorrência de ventos nos dias de coleta.

Para a obtenção real da informação de vento ocorrida no dia de cada análise, os dados horários da estação automática oficial do INMET foram armazenados. Esta estação está posicionada dentro do limite da UFV, próximo aos exemplares avaliados, distante a menos de 2 km da amostra mais afastada.

A coleta de dados sobre a inclinação da placa das raízes foi realizada com o *Tree Motion Sensors*, TMS (Figura 5). Este equipamento registra a inclinação real da placa de raiz da árvore, obtido como resposta a ação de ventos naturais e efeitos circundantes causados por outros elementos, como árvores próximas, infraestrutura urbana e passagem de carros. Tal informação permite, portanto, inferir sobre a ancoragem da árvore.

Figura 5 - Equipamento utilizado: *Tree Motion Sensors* (TMS) Argus Electronic GMBH



DADOS: 1 – Sensor TMS; 2 – Bolha de nível no sensor; 3 – Sensores de base e controle instalados na árvore. Fonte: A autora (2019)

O equipamento, que registra o movimento dinâmico da árvore, TMS, é do fabricante Argus Electronic GMBH, uma tecnologia alemã que permite obter a inclinação de registros na zona de raiz da árvore nas direções X, Y e Z (Norte/Sul, Leste/Oeste e vertical), com uma precisão de 0,01° fazendo 20 leituras por segundo (20 Hz). O sensor possui bateria recarregável interna e pode operar por mais de 20 dias fazendo medições contínuas. O aparelho foi confeccionado para resistir às intempéries, sendo que o cartão de memória para registro dos dados localiza-se em uma parte fechada com tampa rosqueada. O TMS funciona de forma autônoma, programável e armazena dados em função do tempo, porém, o acesso aos resultados só é possível depois de baixados em um computador. Os dados gerados são compactados, codificados e armazenados em arquivos binários no cartão micro SD. Ao final de cada período de monitoramento o sensor foi removido da árvore e os dados do cartão micro SB foram transferidos para um computador e por meio do *software Treesensor* foram armazenados no formato de arquivo de texto.

Neste trabalho foram utilizados cinco pares destes sensores. Os sensores, pequenos, portáteis e não invasivos, foram fixados à árvore usando dois parafusos. Um par de sensores TMS foi utilizado em cada árvore selecionada, onde um sensor foi fixado na base da árvore, entre 5 e 10 centímetros acima do nível do solo, denominado de “sensor de base” e o segundo, chamado de “controle”, foi instalado no caule da árvore a dois metros de altura acima do solo, assim como recomendado por Gocke, Rust e Rust (2018) (Figura 5).

A necessidade da utilização de dois sensores em um mesmo indivíduo serve para certificar que ocorreu um evento de vento na árvore e eliminar ruídos, através da comparação dos dados dos sensores de controle e base. O sensor de controle registra a inclinação devido à rotação da base, mais a inclinação adicional devido à flexão do tronco e uma aceleração devido ao deslocamento do tronco à medida que a árvore oscila de um lado para o outro, já o sensor de base mede apenas a inclinação no nível do solo. Os dados registrados pelo sensor da base são, portanto, os valores de inclinação da placa de raízes, que permite compreender sobre ancoragem da árvore.

Com a ajuda de uma bússola os aparelhos foram posicionados sempre na direção norte, para padronizar a coleta entre todos os indivíduos, além de coincidir com o valor 0° fornecido automaticamente pelo gráfico radar gerado no *software Treesensor*. Os sensores foram também alinhados horizontalmente utilizando uma bolha de nível (Figura 5). A instalação dos sensores “controle” precisou ainda da utilização de uma escada telescópica e

para facilitar a instalação do aparelho na árvore utilizou-se uma parafusadeira portátil. Assim, em média foi preciso 20 minutos para instalar os equipamentos em cada árvore.

Após a instalação dos equipamentos e acionamento do processo de registro, a duração da coleta foi de três horas disponibilizando neste período um total de 216.000 dados por árvore. O período de três horas foi considerado suficiente em pesquisa similar para analisar a estabilidade das espécies *Populus canadenses*, *Quercus robur* e *Alnus glutinosa* na Alemanha (ESCHE; DETTER; RUST, 2018).

Exceto para a avaliação da estabilidade em condição ideal, onde a análise simultânea entre os indivíduos não era relevante, em cada dia de coleta procurou-se amostrar uma determinada espécie em suas diferentes condições de análise (canteiro ou poda). Ou seja, no mesmo dia, com o uso de cinco sensores, foi possível analisar, por exemplo, a espécie A no canteiro restrito com a espécie A do canteiro ideal, mais a espécie B com a copa natural junto com a espécie B de copa unilateral e ainda um indivíduo em condição ideal, totalizando os cinco pares de sensores disponíveis. Ou também todas as condições de copa do indivíduo da espécie A (copa natural, poda em L, poda em V e poda unilateral), com sobra de um par de equipamentos, neste caso. Devido à falta de proximidade entre os exemplares, muitas vezes não foi possível essa otimização, já que havia necessidade de sempre existir ao menos um pesquisador monitorando os equipamentos para evitar prejuízos com interferências humanas bem como garantir a integridade dos sensores.

### 3.2.3 Processamento dos dados

O *software* “Treesensor” utilizado para a transferência dos dados obtidos pelo equipamento para o computador, também foi utilizado para gerar um relatório detalhado sobre os registros, em arquivo texto, como mencionado. Esse relatório fornece um resumo completo do movimento da placa de raiz da árvore que ocorreu durante o período de monitoramento.

A variável utilizada para expressar a inclinação da placa de raízes, fornecida pelo sensor, denominada no arquivo, como inclinação resultante (xy) foi checada após todos os dias de coleta. Isto porque, os dados do sensor de controle servem para distinguir entre a inclinação e o ruído de "fundo", desta maneira, a inclinação do sensor de base só é validada se a inclinação do sensor de controle for maior (GOCKE; RUST; RUST; 2018). Quando esta premissa não foi alcançada, a coleta teve que ser repetida.

Após a finalização das coletas em campo, os arquivos texto gerados foram transferidos para o *software* Microsoft Office Excel, onde foi possível organizar as informações em planilhas separadas para cada tipo de análise – condição ideal, influência das podas e tipo de canteiro.

A inclinação máxima registrada para uma árvore ao longo do período de monitoramento tem sido utilizada como o principal critério para avaliar a ancoragem da raiz da árvore em diversos trabalhos, como os realizados por Gocke, Rust e Rust (2018) e James, Hallan e Spencer (2013b). Contudo, segundo os últimos autores, embora esse valor máximo de inclinação seja útil para apontar os picos transitórios que ocorrem durante os ventos e para dar uma indicação da estabilidade da árvore, pode ser uma simplificação excessiva da resposta total da árvore. Desta maneira, além do valor de inclinação máxima, viu-se a necessidade de abordar a média gerada por todo o conjunto de dados, bem como o número de ocorrências de inclinação, conforme descrito:

- a) inclinação máxima da árvore - maior valor de inclinação observado para o indivíduo durante todo o período de monitoramento, refere-se a um único dado obtido em determinado segundo;
- b) inclinação média da árvore - média dos valores de inclinação do indivíduo obtidos ao longo de todo o período de monitoramento, refere-se à média do conjunto de 216.000 dados registrados;
- c) número de ocorrências – número de registros de inclinação por indivíduo, refere-se a quantidade de vezes em que a placa de raízes oscilou ao longo de todo o período de monitoramento.

O número de ocorrências permitiu constatar quantas vezes cada árvore reagiu a episódios de vento, ao longo das três horas de monitoramento, sendo o resultado expresso em porcentagem de tempo. Para isso foi necessário considerar que a cada segundo o aparelho fornece 20 registros de dados, assim, no caso de o sensor registrar inclinação a todo o tempo teríamos a seguinte relação:

$$1h = 3.600'' * 3h = 10.800'' * 20 = 216.000 \text{ dados de inclinação}$$

Desta maneira, em três horas de monitoramento o sensor poderia registrar 216.000 dados de inclinação, o que representa 100% do tempo. Por meio de regra de três, com a

contagem dos eventos de inclinação para cada indivíduo foi possível obter a porcentagem de tempo monitorado em que a árvore apresentou inclinação da placa de raiz.

Além dos dados de inclinação, foram medidas algumas variáveis dendrométricas, que também precisaram ser transferidas e processadas no *software* Microsoft Office Excel, assim como os valores diários de vento obtidos no site do INMET.

Através dos valores de diâmetro da copa obtidos em campo, foi possível estipular a área da copa para cada indivíduo, pela fórmula tradicional de área da circunferência:

$$A_c = \pi * \left(\frac{d^2}{2}\right)$$

ONDE:

$A_c$  - área da circunferência  
 $d$  - diâmetro da copa

A subtração dos valores de altura do início da copa dos valores de altura total permitiu conhecer a altura da copa de cada indivíduo, com esse valor e com o valor médio do diâmetro da copa foi possível calcular o volume de copa para cada indivíduo, através da fórmula tradicional do volume do cilindro:

$$V_c = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 * H_t$$

ONDE:

$V_c$  - volume da copa  
 $d$  - diâmetro da copa  
 $H_t$  - altura da copa

Vale ressaltar que para o cálculo da área e do volume de copa não se levou em conta os formatos de copa característicos de cada espécie. Para o cálculo do volume de fuste utilizou-se a fórmula advinda de equações volumétricas aplicáveis ao manejo sustentado de florestas nativas no estado de Minas Gerais:

$$V_f = 0.00007423 * (CAP * 100)/\pi)^{1,707348} * H_t^{1,16873}$$

ONDE:

$V_f$  - volume do fuste  
 CAP - circunferência à altura do peito (1,30m)  
 $H_t$  - altura total

Para o cálculo do volume do fuste não houve a cubagem das árvores, o cálculo da variável se deu através dos dados dendrométricos de CAP e altura total estimada em campo. A fórmula de equação volumétrica foi escolhida pelo fato de que seis das nove espécies

utilizadas no estudo são nativas. Todas essas variáveis foram utilizadas principalmente para caracterizar os indivíduos, mas também para estabelecer relação entre as características dendrométricas e o comportamento de inclinação em diferentes situações.

### 3.2.3.1 Análise das árvores em condição ideal

A avaliação da inclinação da placa de raízes em condições ideais permitiu definir o comportamento das diferentes espécies estudadas quanto a sua ancoragem. Ao analisar os dados, observou-se certa relação entre os valores de inclinação e as variáveis dendrométricas, por esse motivo, os dados foram submetidos a uma análise estatística de correlação. Os coeficientes de correlação de Pearson foram calculados através do programa computacional Genes.

O coeficiente de correlação de Pearson assume apenas valores entre -1 e 1, ou seja, a correlação fica perfeita à medida que a se aproxima de 1. Quando a correlação encontrada é igual a 1 representa uma correlação perfeita e positiva entre duas variáveis, quando a correlação é igual à -1, representa correlação perfeita negativa entre duas variáveis, neste caso, enquanto uma variável aumenta a outra diminui (GALARÇA et al., 2010).

Para interpretar os valores encontrados na correlação de Pearson utilizou-se o parâmetro citado por Mukaka (2012), onde valores acima de 0,9 indicam uma correlação muito forte; de 0,7 a 0,9, correlação forte; de 0,5 a 0,7, correlação moderada; de 0,3 a 0,5, correlação fraca; e de 0 a 0,3, correlação desprezível, todas elas incluindo valores positivos ou negativos.

Outra análise realizada para as espécies em condição ideal consistiu em aprofundar o entendimento sobre a inclinação máxima da placa de raízes e assim estabelecer padrões que servirão como base de referencia para tais espécies. Desta forma, para cada espécie foi apresentado, por meio de gráfico, o ângulo de inclinação máximo registrado por um único indivíduo da espécie, bem como a média de inclinação máxima registrada entre todos os indivíduos da espécie. Além de sinalizar a maior inclinação atingida pela espécie (um único indivíduo), considerou-se importante realizar uma média entre os indivíduos para estabelecer a tendência de comportamento das espécies.

Foi possível também analisar a relação entre a inclinação da placa de raízes e a rajada de vento ocorrida nos dias de coleta, obtidas na estação oficial do INMET. Para isso, também no *software* Microsoft Office Excel, elaborou-se um gráfico de dispersão entre as variáveis:

inclinação máxima da placa de raízes (eixo y) e rajada de vento máxima obtida durante o período de monitoramento (eixo x). A partir da equação gerada pelo diagrama de dispersão, foi possível avaliar tal relação.

A última análise aplicada para as árvores em condições ideais foi referente ao número de ocorrências e a direção de inclinação da placa de raiz. O *software Treesensor* foi utilizado para a elaboração dos gráficos radar, que permitem observar essa direção de movimentação. O gráfico radar consiste na plotagem das informações XY, referentes à inclinação norte/sul (Y) e leste/oeste (X) da placa de raiz, indicando a resposta direcional da árvore à ação do vento. Os dados apresentados individualmente para cada espécie foram apenas do sensor da base, referente aos valores de inclinação da placa de raízes. Em cada gráfico foi informado também a número de ocorrências de inclinação, expresso em porcentagem de tempo.

#### 3.2.3.2 Influência dos tipos de poda

A inclinação da placa de raízes registrada em diferentes indivíduos com característica de copa variada permitiu definir o comportamento de ancoragem das árvores submetidas a diferentes tipos de poda. Foram apresentadas em tabela as médias das variáveis inclinação máxima e inclinação média, por espécie e por tipo de poda. A variável número de ocorrência de inclinação foi apresentada separadamente, em gráfico, para facilitar interpretação.

Os dados foram avaliados para determinar a existência de diferença estatística entre os tipos de poda, com a aplicação dos testes F e t, calculados no *software* Microsoft Office Excel. A análise foi realizada de forma pareada para cada tipo de poda, comparado sempre os dados das árvores de copa natural com algum tipo de poda – copa natural e poda em V; copa natural e poda em L; copa natural e poda unilateral. A análise comparativa única não pôde ser realizada devido ao delineamento experimental estabelecido, que foi limitado pelo número restrito de sensores.

O teste F foi utilizado para analisar se a variância entre o conjunto de dados era considerada distinta ou equivalente, informação necessária para a aplicação definitiva do teste t, este por sua vez compara estatisticamente a diferença entre as médias. A análise estatística foi realizada para as três variáveis: inclinação máxima; inclinação média e número de ocorrência. Contudo, destaca-se que a análise estatística aplicada à variável inclinação média é a mais representativa do conjunto, uma vez que contempla todo o conjunto de dados

registrados durante três horas e não um único valor por indivíduo, como obtido para inclinação máxima e número de ocorrências.

Foi realizado ainda uma análise comparativa entre todos os tipos de poda e a copa natural em indivíduos da espécie *Caesalpinia peltophoroides* e *Delonix regia*. Isso foi possível devido a coleta de dados ter sido realizada simultaneamente entre as árvores, que por sua proximidade, garante a existência das mesmas condições de vento. Essa análise só foi realizada para essas duas situações devido a necessidade de repetições das coletas, que impediram a realização simultânea para todo o experimento. Nesta análise foram apresentados gráficos dos valores de inclinação máxima e média para cada espécie, por tipo de condição de copa.

### 3.2.3.3 Influência das diferentes condições de canteiro

A inclinação da placa de raízes registrada em diferentes indivíduos com características distintas de plantio permitiu definir o comportamento de ancoragem das árvores plantadas em canteiro restrito e intermediário. Os resultados desta análise foram apresentados separadamente, primeiro a análise do canteiro restrito e depois do intermediário.

Para cada condição foram apresentadas em tabelas as médias das variáveis inclinação máxima, inclinação média e número de ocorrência de inclinação, comparativamente entre a condição ideal e estas. Também foram apresentados gráficos para evidenciar o valor de inclinação máxima coletado para as espécies, bem como a média desta variável entre os indivíduos da mesma espécie.

Assim como realizado para a análise da influência das podas, os dados foram avaliados para determinar a existência de diferença estatística entre os tipos de canteiros, com a aplicação dos testes F e t, calculados no *software* Microsoft Office Excel. A análise foi realizada de forma pareada, a condição de plantio ideal foi comparada primeiro com o canteiro restrito e depois com o canteiro intermediário. Nesta situação, também não foi possível realizar uma análise comparativa única devido ao delineamento experimental estabelecido, limitado pelo número restrito de sensores. Os demais detalhes sobre os testes estatísticos informados para a análise da influência dos tipos de poda também podem ser aplicados aqui.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM CONDIÇÕES IDEAIS

#### 4.1.1 Comportamento de diferentes espécies e suas características

A inclinação da placa de raiz foi demonstrada pelo ângulo de inclinação registrado no sensor. Para os 27 indivíduos arbóreos analisados foi encontrada uma variação média de inclinação entre  $0,0176^\circ$  e  $0,1140^\circ$  e uma variação no ângulo de inclinação máximo de  $0,0849^\circ$  a  $2,6296^\circ$  (Tabela 1). Tais valores foram obtidos em condições de rajada de vento inferiores a 48,6 Km/h.

Tabela 1: Inclinação da placa de raiz e caracterização das árvores em condição ideal

Espécie/Imed	Imed	Imax	DAP (m)	h (m)	DCme (m)	Vc (m <sup>3</sup> )	Vt (m <sup>3</sup> )	Ac (m <sup>2</sup> )
<i>Lagerstroemia speciosa</i> 0,0817	0,1140	2,6296	0,18	6,80	7,10	139	0,07	39,59
	0,0785	1,4052	0,21	7,70	7,05	133	0,11	39,04
	0,0526	1,4595	0,25	6,30	7,68	140	0,13	46,26
<i>Libidibia ferrea</i> 0,0446	0,0481	0,2307	0,22	9,00	10,80	458	0,14	91,61
	0,0452	0,1823	0,49	15,00	12,41	484	1,14	120,96
	0,0406	0,1512	0,33	11,00	13,98	460	0,39	153,39
<i>Licania tomentosa</i> 0,0415	0,0405	0,1693	0,44	11,00	11,79	933	0,68	109,08
	0,0447	0,1988	0,33	11,00	11,50	270	0,38	103,78
	0,0306	0,0938	0,35	12,00	11,26	535	0,46	99,58
<i>Handroanthus serratifolius</i> 0,0400	0,0238	0,1561	0,43	11,00	11,12	194	0,64	97,12
	0,0524	1,1218	0,50	11,00	16,60	1515	0,88	216,42
	0,0439	0,7738	0,41	10,00	12,40	761	0,53	120,76
<i>Handroanthus impetiginosus</i> 0,0386	0,0464	0,1642	0,42	12,00	16,60	2164	0,69	216,42
	0,0384	0,1725	0,46	11,00	15,05	978	0,74	177,89
	0,0397	0,2155	0,25	7,00	11,25	348	0,15	99,40
<i>Caesalpinia peltophoroides</i> 0,0377	0,0248	0,1972	0,32	11,00	13,71	787	0,36	147,63
	0,0389	0,1337	0,31	10,00	7,23	328	0,31	41,00
	0,0493	0,8569	0,37	13,00	12,65	628	0,57	125,58
<i>Spathodea campanulata</i> 0,0288	0,0279	0,2988	0,68	13,00	13,23	1526	1,91	137,47
	0,0386	0,1054	0,50	12,00	14,78	1423	0,95	171,45
	0,0198	0,1355	0,81	15,00	14,55	1496	3,19	166,27
<i>Ceiba speciosa</i> 0,0249	0,0198	0,1175	0,84	15,00	19,60	3319	3,42	301,72
	0,0346	0,0849	0,81	13,00	12,65	1106	2,72	125,68
	0,0204	0,1252	1,18	14,00	15,40	1676	6,21	186,27
<i>Delonix regia</i> 0,0196	0,0205	0,1067	0,85	8,00	20,45	1199	1,84	328,46
	0,0206	0,6254	0,71	8,00	15,60	1051	1,30	191,13
	0,0176	0,1059	0,81	8,00	18,80	1110	1,69	277,59

NOTA: Imed - Inclinação média; Imax – Inclinação máxima; DAP – Diâmetro altura do peito; h – Altura árvore; DCme – Diâmetro médio de copa; Vc – Volume da copa; Vt – Volume do tronco; Ac – Área da copa.

Do total de árvores estudadas, 74% registraram valores de inclinação máxima abaixo de  $0,50^\circ$ . Este resultado se assimila ao encontrado por James, Hallam e Spencer (2013b) onde a maioria das árvores apresentaram valores de inclinação abaixo de  $0,50^\circ$  em ventos fortes, podendo ser consideradas estáveis. Os autores afirmaram ainda que as árvores estáveis, bem ancoradas no solo, devem permanecer dentro de um intervalo definido de inclinação.

*Lagerstroemia speciosa* foi a espécie que apresentou maiores valores de inclinação média, seguida por *Libidibia ferrea*, *Licania tomentosa*, *Handroanthus serratifolius*, *Handroanthus impetiginosus*, *Caesalpinia peltophoroides*, *Spathodea campanulata*, *Ceiba speciosa* e *Delonix regia*.

A maior inclinação máxima e média da placa de raízes foi registrada na espécie *Lagerstroemia speciosa* ( $2,6296^\circ$  e  $0,1140^\circ$  respectivamente), identificada no indivíduo com menor DAP amostrado. Já as menores médias de inclinação foram encontradas nos indivíduos com maior DAP, superiores a 80 cm, sendo estes pertencentes às espécies *Spathodea campanulata*, *Delonix regia* e *Ceiba speciosa*.

Ao analisar apenas a máxima inclinação por espécie, foi possível observar que o maior ângulo de inclinação foi registrado nos indivíduos com menores valores de diâmetro também para as espécies *Delonix regia*, *Handroanthus impetiginosus*, *Licania tomentosa* e *Libidibia ferrea*. Já para *Handroanthus serratifolius*, *Ceiba speciosa* e *Caesalpinia peltophoroides* foi o contrário, ocorreu nos maiores valores de diâmetro.

A inclinação média apresentou valores mais elevados nos indivíduos com menores valores de diâmetro também para as espécies *Spathodea campanulata*, *Delonix regia*, *Licania tomentosa*, *Ceiba speciosa* e *Libidibia ferrea*. Para as espécies *Handroanthus serratifolius* e *Caesalpinia peltophoroides* as maiores inclinações médias ocorreram nos maiores valores de DAP.

Os resultados referentes à relação entre inclinação e DAP, evidenciaram que a inclinação da placa de raízes tende a ser menor em árvores com DAP maiores, isto porque as árvores com maiores diâmetros mostram-se mais rígidas na base do tronco, flexionando pouco (JAMES et al. 2013a). O uso da variável DAP também já foi apontado como um dos principais fatores para auxiliar na previsão do momento crítico de queda de árvores por Kamimura et al. (2012).

Para as variáveis altura, diâmetro médio de copa e área de copa não se constatou relação aparente com os ângulos de inclinação máximo e médio. Já para volume do tronco foi possível observar uma tendência: quanto menor o volume maior a inclinação média da placa

de raízes, conseqüentemente espera-se, de acordo com Stokes (1999), que árvores com volumes menores sejam mais susceptíveis ao desenraizamento. Isto ocorreu em indivíduos das espécies *Lagerstroemia speciosa*, *Spathodea campanulata*, *Delonix regia*, *Licania tomentosa*, *Ceiba speciosa* e *Libidibia ferrea*. O volume de tronco já foi apontado como um dos principais fatores para auxiliar na previsão do momento crítico de queda de árvores em estudo de Lundström, Jonsson e Kalberer (2007), na Suíça, com 66 indivíduos da espécie *Picea abies* L. Karst. e por Peterson e Claassen (2013), na Geórgia, com as espécies *Pinus taeda* e *Liriodendron tulipifera*, em que observaram que a ancoragem aumenta à medida que aumenta o volume do tronco.

Resultados semelhantes também foram encontrados em estudo sobre ruptura de árvores em um teste de tração, onde foi constatado que a capacidade de uma árvore resistir ao desenraizamento (ruptura das raízes) está diretamente relacionada ao volume do tronco, ou seja, qualquer aumento de volume aumenta a resistência da árvore ao desenraizamento (PELTOLA et al., 2000).

Quanto ao volume de copa constatou-se que as maiores inclinações médias ocorreram nas árvores com menor volume de copa em espécies de *Spathodea campanulata*, *Delonix regia*, *Licania tomentosa*, *Ceiba speciosa* e *Libidibia ferrea*. Estudo anterior, na Alemanha, já havia observado em árvores com volume de copa menor ou até mesmo sem folhas, uma maior movimentação da placa de raízes quando comparadas às de volume de copa maior (GOCKE; RUST; RUST; 2018). Uma explicação para isso é que o movimento dinâmico das folhas e galhos das copas sob a ação do vento tem o efeito de amortecimento, reduzindo os impactos do balanço harmônico potencialmente perigoso ao tronco da árvore (JAMES; HARITOS; ADES, 2006).

Vale destacar, contudo, que os registros foram realizados em condições normais de vento e não em eventos extremos, em busca de estabelecer informações do padrão normal de inclinação das espécies. No entanto, pode-se justificar que *Lagerstroemia speciosa* apresentou a maior inclinação dentre as espécies, porque teve a influência de maiores rajadas de vento durante o período de coleta dos dados.

Os resultados encontrados nesta análise permitiram estabelecer um padrão inicial referente ao comportamento de inclinação da placa de raiz de diferentes espécies utilizadas na arborização. Além disso, foi possível observar que as menores inclinações da placa de raiz aparentemente ocorreram em árvores com maiores valores de DAP, maior de volume de

tronco e as maiores inclinações médias em árvores com os menores valores de volume de copa.

#### 4.1.2 Influência das variáveis dendrométricas

Ao notar indícios de relação entre a inclinação da placa de raiz e algumas características das árvores descritas no tópico anterior, buscou-se realizar uma análise mais específica. Assim, as variáveis dendrométricas foram correlacionadas com as inclinações médias, máximas e o número de ocorrências de inclinação das árvores (Tabela 2).

Tabela 2: Resultado da correlação de Pearson aplicada entre variáveis dendrométricas e as variáveis de inclinação analisadas

Variáveis dendrométricas	Inclinação Média	Inclinação Máxima	Ocorrência de inclinação
DAP (m)	-0,7696*	-0,4989 <sup>ns</sup>	-0,5652 <sup>ns</sup>
Diâmetro de copa (m)	-0,8942**	-0,7058*	-0,5871 <sup>ns</sup>
Altura total (m)	-0,5545 <sup>ns</sup>	-0,6875*	-0,4521 <sup>ns</sup>
Altura copa (m)	-0,567 <sup>ns</sup>	-0,5335 <sup>ns</sup>	-0,487 <sup>ns</sup>
Altura início da copa (m)	0,0045 <sup>ns</sup>	-0,2700 <sup>ns</sup>	0,0438 <sup>ns</sup>
Volume de copa (m <sup>3</sup> )	-0,726*	-0,5850 <sup>ns</sup>	-0,5837 <sup>ns</sup>
Volume tronco (m <sup>3</sup> )	-0,6025 <sup>ns</sup>	-0,4192 <sup>ns</sup>	-0,5415 <sup>ns</sup>
Área de copa (m <sup>2</sup> )	-0,8441**	-0,6090 <sup>ns</sup>	-0,5533 <sup>ns</sup>

NOTA: \*\* Significativo a nível de 1% de probabilidade de erro, \* Significativo a 5% e <sup>ns</sup> não significativo; Sinais negativos indicam relação inversa entre as variáveis.

As variáveis dendrométricas que tiveram correlação significativa com o ângulo médio de inclinação foram diâmetro à altura do peito (DAP), diâmetro de copa, volume de copa e área da copa. Os valores indicaram que estas variáveis foram as únicas que exerceram forte correlação. Dentre elas, o diâmetro de copa médio foi o que apresentou maior correlação, indicando que 89% da inclinação média pode ser explicada por esta característica.

As variáveis altura total, altura de copa e volume do tronco apresentaram correlação moderada com o ângulo de inclinação médio. Destaca-se ainda que a correlação existente foi negativa para essas variáveis, ou seja, quanto maiores os valores dendrométricos menores foram as ocorrências de inclinação, pelo fato de serem variáveis inversamente proporcionais.

Em estudo realizado por Peltola et al. (2000), os autores verificaram uma correlação significativa entre o momento resistivo máximo na base do tronco, ou seja, a resistência ao desenraizamento, e as variáveis dendrométricas, DAP e área de copa. Árvores de mesma

altura com maiores DAP's foram mais resistentes ao desenraizamento do que árvores com menores DAP's.

Sobre o diâmetro de copa médio, estudos anteriores relataram que conforme ocorre redução da copa, há uma tendência de diminuição do efeito de amortecimento tornando as árvores mais suscetíveis às forças do vento (MILNE, 1991; JAMES, 2006). Ou seja, as cargas do vento são minimizadas pelo movimento complexo da copa, havendo uma redução da força transmitida para o tronco, dele pras raízes e seguida para o solo.

O ângulo de inclinação máximo da placa de raízes apresentou forte correlação significativa com a variável diâmetro de copa (0,70) e correlação moderada com a variável altura total, ao nível de 5% de significância. Ambas as correlações negativas, indicam que quanto maior o diâmetro de copa e a altura da árvore, menor será o valor de inclinação máxima.

Árvores de copas maiores sofrem maior influência dos ventos e isso provoca tensões de crescimento no tronco desenvolvendo uma maior resistência mecânica e, conseqüentemente, aumentando sua resistência às rajadas de ventos (STATHERS; ROLLERSON; MITCHELL; 1994). Nielsen (2005) encontrou que diâmetros superiores e maiores áreas de copa implicam em maior estabilidade quando relacionados à altura. Desta forma, quanto menor a relação altura/diâmetro e maior a relação entre comprimento da copa/altura total mais estável são as árvores.

Não houve correlação significativa entre os elementos dendrométricos e a ocorrência de inclinação da placa de raízes, porém os maiores valores obtidos também foram para as variáveis DAP, diâmetro de copa médio, volume de copa, volume de tronco e área de copa.

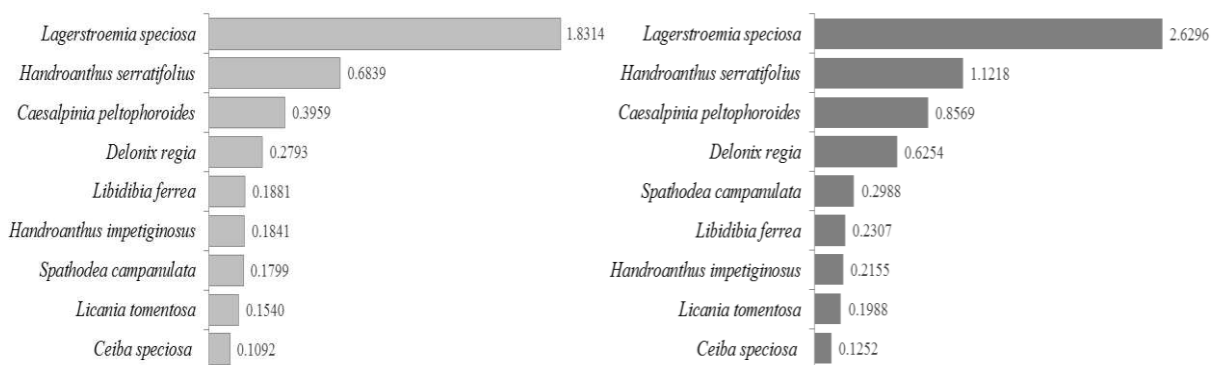
Compreender quais variáveis dendrométricas mais interferem na ancoragem das árvores para diferentes espécies é fundamental. Isto porque, alguns autores já afirmaram que, geralmente o momento crítico para queda da árvore tem relação com as dimensões da árvore, e de forma geral, não diferem de maneira significativa entre as espécies de tamanho similar (PETERSON; CLAASSEN 2013; CANNON; BARRETT; PETERSON; 2015; RIBEIRO, 2015).

Nesta avaliação foi possível confirmar estatisticamente a relação entre as variáveis dendrométricas, DAP, altura total, diâmetro de copa, volume de copa e área de copa com a inclinação da placa de raiz. Porém, apenas o DAP e o diâmetro de copa apresentaram forte correlação com a inclinação, permitindo afirmar que árvores mais estáveis apresentam maiores valores de diâmetro de copa e DAP.

### 4.1.3 Inclinação máxima para cada espécie

Determinar a inclinação máxima que indivíduos de uma determinada espécie atingem, em condições ideais de desenvolvimento, permite estabelecer padrões que podem ser utilizados como referência para análises futuras quanto à estabilidade das árvores. Destaca-se, no entanto, que o valor apresentado por um único indivíduo, nem sempre é representativo e por isso deve-se estabelecer um padrão principalmente com base na média encontrada entre vários indivíduos da mesma espécie (Figura 6).

Figura 6 - Média da inclinação máxima por espécie (esquerda) e valor máximo apresentado por um indivíduo da espécie (direita)



Fonte: A autora (2019)

Em condições ideais de desenvolvimento indivíduos de *Lagerstroemia speciosa* apresentaram inclinação máxima de 1,831°, no qual um indivíduo alcançou até 2,6296°. Das espécies analisadas, *Handroanthus serratifolius* foi a segunda com maior valor de inclinação seguida da espécie *Caesalpinia peltophoroides*. *Ceiba speciosa* apresentou inclinação de 0,1092°, onde a inclinação máxima atingida em um dos indivíduos foi de 0,1252°, a menor dentre as analisadas.

A elaboração dos gráficos de inclinação máxima permitiu definir um padrão de cada espécie, contudo é importante destacar que fatores externos, não mensurados nesse trabalho, como arquitetura radicular e tipo de solo, também influenciam diretamente no equilíbrio desses indivíduos (JAMES; HARITOS; ADES, 2006). Independente disso é possível afirmar que indivíduos de *Lagerstroemia speciosa* toleram uma inclinação de até 1,83° em sua placa de raiz, sem provocar ruptura. Para *Handroanthus serratifolius* esse valor foi de 0,68° e

*Caesalpinia peltophoroides* 0,39°. Para os demais indivíduos os valores podem ser observados na Figura 6.

A definição destes padrões de inclinação visa estabelecer uma alternativa na avaliação da estabilidade de árvores, que por consequência permite inferir sobre a probabilidade de a árvore vir à queda. Tal como observado, esse comportamento de inclinação é variável entre as espécies e por isso precisa ser conhecido e considerado espécie por espécie. Isto porque, as árvores conseguem resistir à sua própria massa e as forças exercidas pelo vento, devido ao seu design mecânico adequado e único, onde a arquitetura da árvore, variável em cada espécie, pode alterar a magnitude espacial de distribuição da carga resultante do vento (RIBEIRO, 2015).

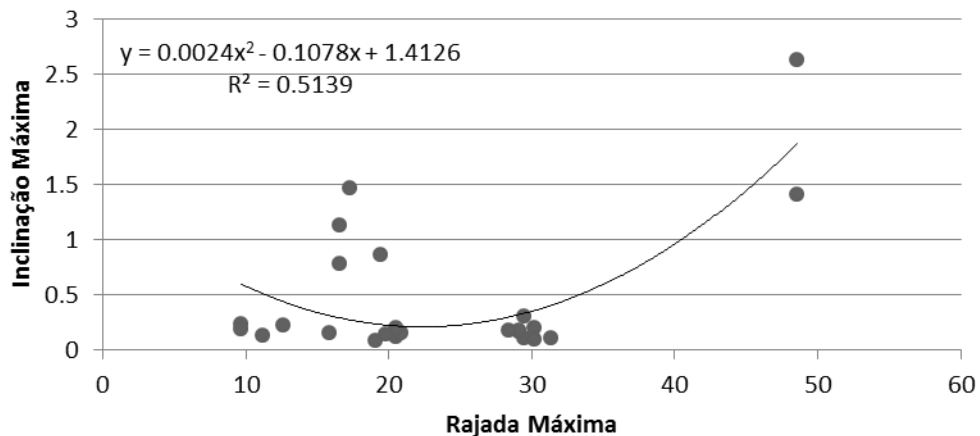
A diferença de comportamento entre as espécies pode envolver uma série de fatores como: a arquitetura das raízes e da copa, o volume do tronco e da copa, profundidade do enraizamento, resistência e densidade da madeira e grau de esbelteza. Contudo, Nock et al. (2009) chama a atenção para o fato de que inferências fundamentadas unicamente na densidade da madeira podem ser potencialmente enganosas para espécies que sofrem complexas interferências ao longo da vida. Já Ribeiro (2015) afirma que o grau de esbelteza, considerado como a capacidade desenvolvida pela árvore de suportar seu próprio peso, é um dos mais importantes indicativos de estabilidade.

No Brasil, ainda não se tinha registros de informações de campo sobre estudos da inclinação da placa de raízes das espécies utilizadas na arborização. Assim, os resultados encontrados podem fornecer indícios dos valores de inclinação da placa de raiz que garantem a estabilidade das árvores destas espécies, por meio de medições reais de campo.

#### **4.1.4 Relação entre a inclinação da placa de raízes e a rajada de vento**

A elaboração do diagrama de dispersão permitiu observar a relação entre a inclinação máxima da placa de raízes, dos 27 indivíduos analisados, em condições ideais de plantio e a rajada máxima de vento encontrada nos horários de monitoramento (Figura 7).

Figura 7 - Diagrama de dispersão entre a inclinação máxima e rajada de vento máxima



Fonte: A autora (2019)

A equação proveniente desta linha de tendência resultou em um coeficiente de determinação de 0,5139, resultado da relação polinomial de segundo grau. Desta maneira, é possível inferir que 51,39% da variação é explicada pelo modelo de regressão, ou seja, aproximadamente 51% dos fatores que influenciam na inclinação foram explicados apenas pela rajada de vento.

A correlação direta entre a inclinação máxima das árvores e as rajadas máximas de vento deve-se aos efeitos dinâmicos do vento, e por isso era de se esperar que variassem no local das medições (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013b). Uma das explicações para os pontos estarem dispersos é, provavelmente, devido à distância de onde foi realizada a análise das árvores e os dados de vento registrados na estação meteorológica (ESCHE; DETTER; RUST; 2018). Assim como no trabalho de Gocke, Rust e Rust (2018) a condição do vento na árvore provavelmente era diferente do vento registrado na estação.

Outro fator importante é a exposição da árvore ao vento, a influência de árvores vizinhas, prédios e casas podem criar barreiras que influenciam na estabilidade de determinada árvore. Árvores em campos abertos experimentam impactos de vento mais frequentes durante o seu desenvolvimento e, portanto, se adaptam alocando recursos estruturais para aumentar a estabilidade (PETERSON; CLAASSEN, 2013), em contrapartida, árvores protegidas, quando expostas ao vento (devido à remoção, por exemplo, de uma árvore vizinha), são árvores mais instáveis, pois não desenvolveram recursos estruturais para aumentar sua estabilidade. Embora a variação da condição de vento seja algo relevante, é importante destacar que não foi encontrado nenhum estudo referente à análise da placa de raízes onde tenha sido monitorada pontualmente a condição de vento, todos utilizaram as

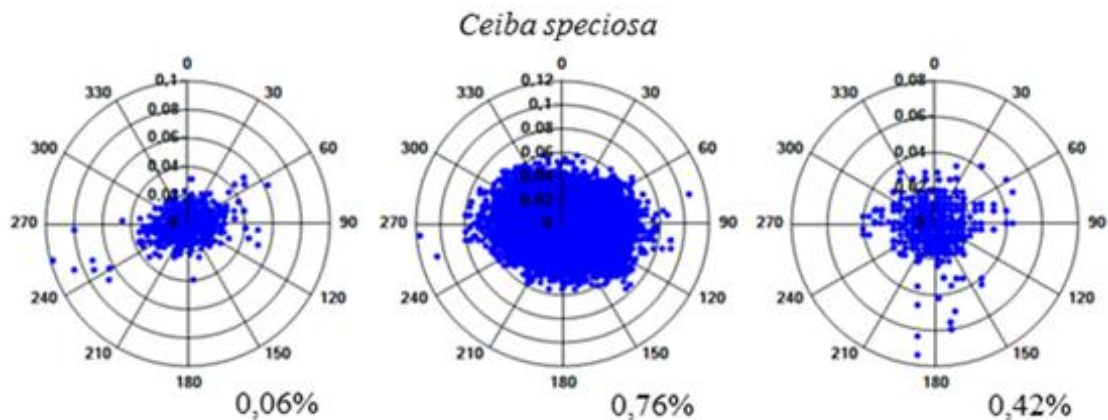
informações das estações oficiais mais próximas, como James, Hallam e Spencer (2013b), Gocke, Rust e Rust (2018), Esche, Detter e Rust, (2018).

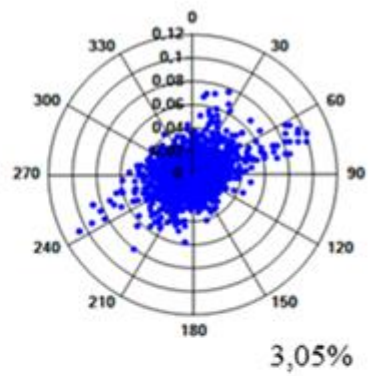
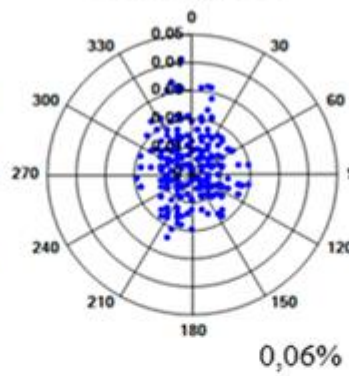
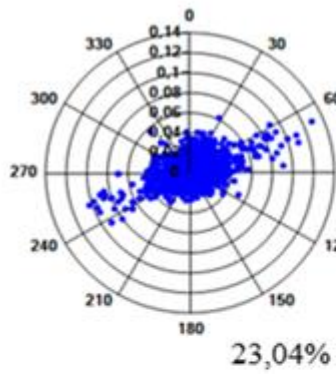
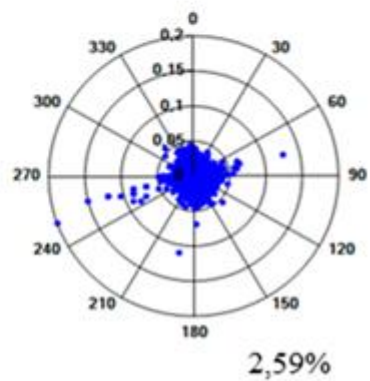
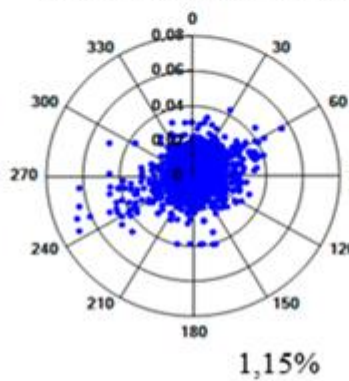
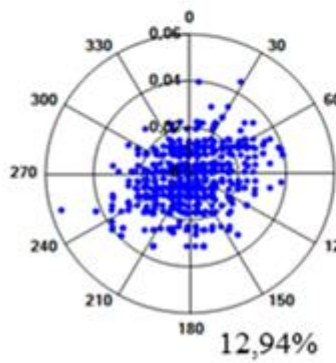
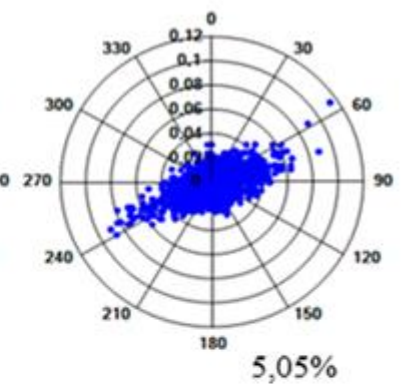
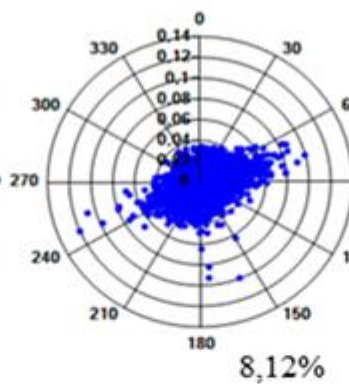
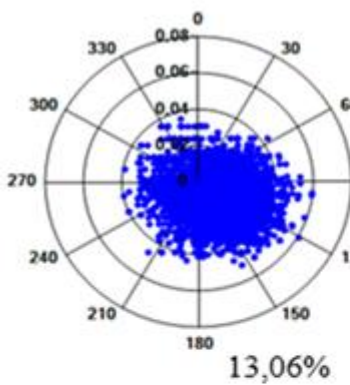
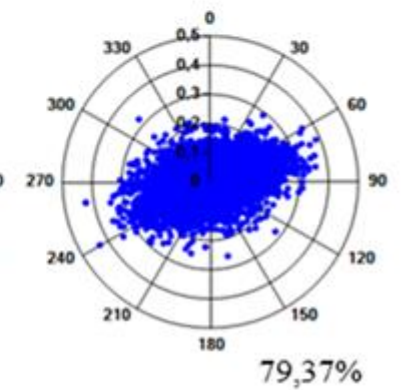
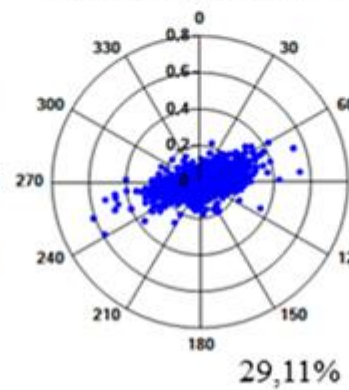
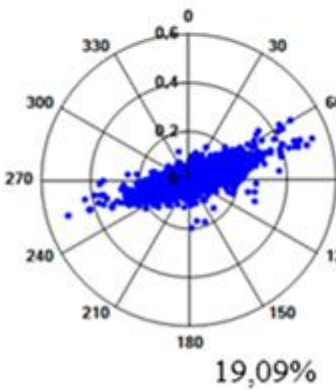
O ambiente urbano expõe essas árvores a diversos fatores externos que podem influenciar no seu equilíbrio, como por exemplo, injúrias, condições inadequadas de plantio, corredores de vento e barreiras formadas pela disposição dos prédios. Tais características interferem significativamente no comportamento de inclinação das espécies, mesmo assim a análise realizada permitiu observar que a rajada de vento foi um fator expressivo para determinar o valor de inclinação máxima da placa de raiz.

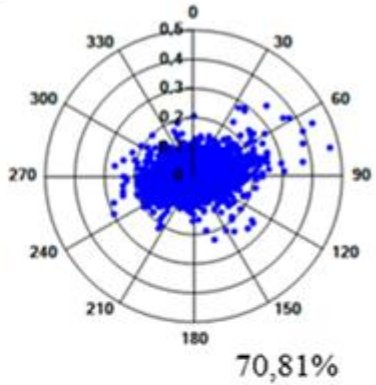
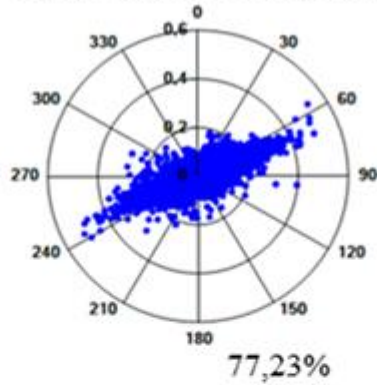
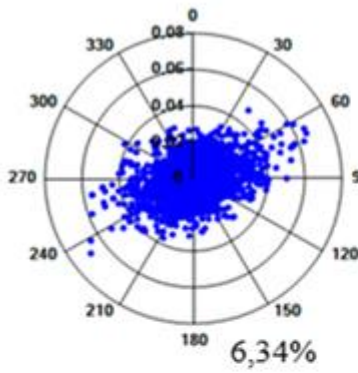
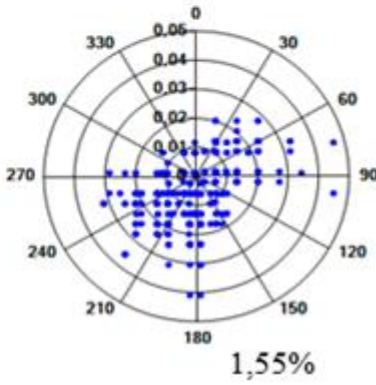
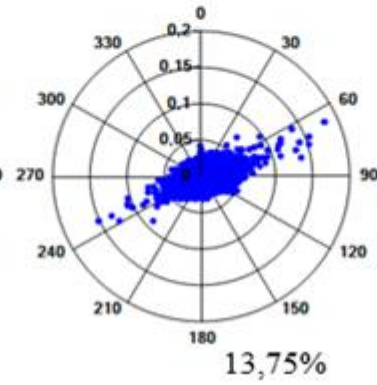
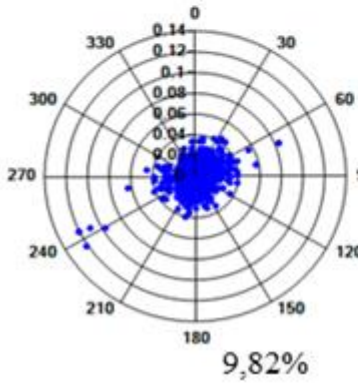
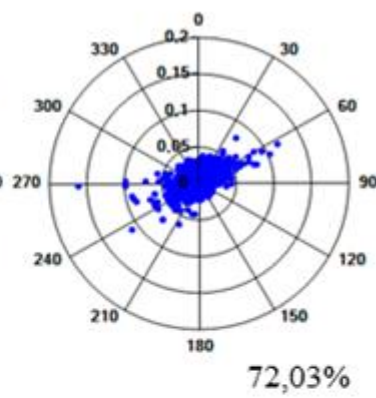
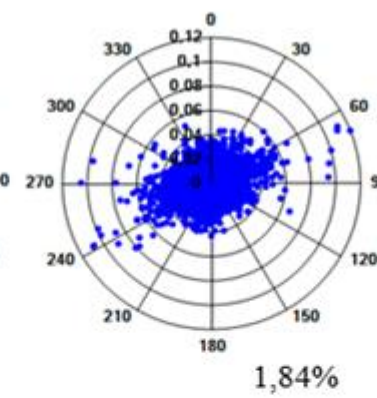
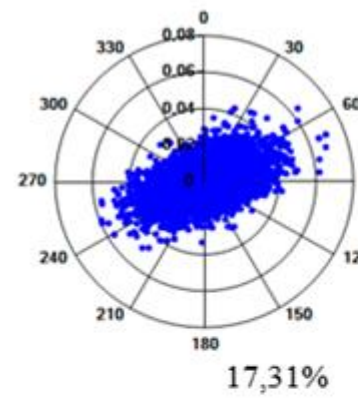
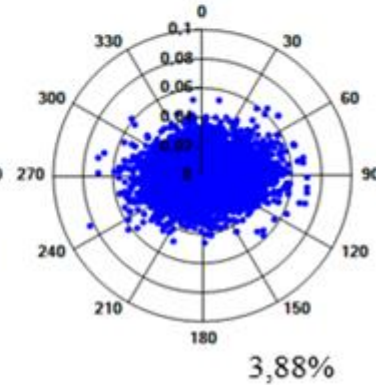
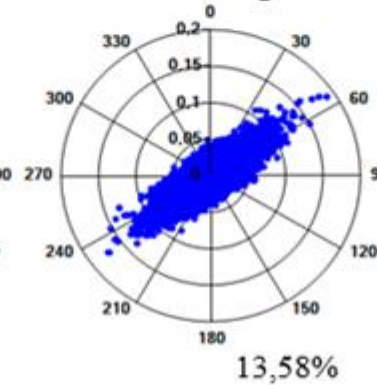
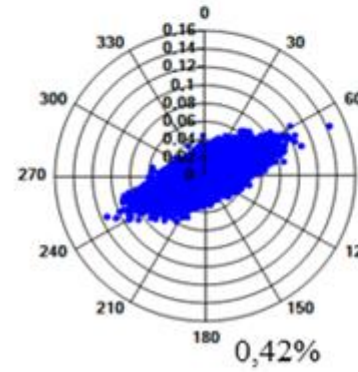
#### 4.1.5 Ocorrência de inclinação para cada indivíduo arbóreo

A contabilização de ocorrências de inclinação permitiu constatar quantas vezes cada árvore reagiu a episódios de vento em um determinado intervalo de tempo e assim informar a porcentagem de tempo monitorado em que a árvore apresentou oscilação. Além disso, o registro pontual da inclinação possibilita uma análise do sentido geográfico predominante de ocorrências (Figura 8).

Figura 8 - Resultados dos pontos de inclinação para cada indivíduo e porcentagem de tempo monitorado em que a árvore apresentou oscilação



*Libidibia ferrea**Spathodea campanulata**Handroanthus impetiginosus**Lagerstroemia speciosa*

*Handroanthus serratifolius**Licania tomentosa**Caesalpinia peltophoroides**Delonix regia*

De maneira geral, é possível observar que a maioria das árvores apresentou tendência de oscilação no sentido sudoeste/nordeste o que pode ter relação com a resposta aos ventos nordeste, predominantes na região (INMET, 2018). Segundo Reis (2005) a direção média anual predominante dos ventos em Minas Gerais é de NE, L e SE e para Neto (2005), a região Sudeste recebe, durante todo o ano, ventos de leste e nordeste. De acordo com os dois autores o principal fator responsável pela predominância dos ventos nessas direções é o anticiclone do Atlântico Sul.

Quanto maior a rajada, mais a árvore se inclina e o movimento de oscilação é principalmente na direção do vento, com alguns movimentos laterais e em loop (JAMES; HARITOS; ADES, 2006). Ainda segundo o autor, durante o movimento de oscilação, a árvore nunca volta ao ponto zero ou de descanso, ela volta em resposta ao vento. Ou seja, a oscilação da maior parte dos indivíduos analisados ocorreu para a direção de vento predominante, alguns indivíduos apresentaram uma oscilação uniforme, sem uma inclinação dominante, o que pode indicar uma verdadeira estabilidade do indivíduo ou uma estabilidade irreal influenciada por barreiras próximas, como casas, prédios ou outras árvores que impedem a ação direta do vento.

Pesquisas já realizadas para avaliar a oscilação da placa de raiz, costumam abordar apenas os valores de inclinação e não o tempo monitorado em que as árvores apresentaram oscilação. Desta forma, não foi encontrado qualquer registro sobre análise dessa quantidade de ocorrências de oscilações, todos abordaram unicamente a inclinação máxima registrada, conforme foi possível observar nas pesquisas de James, Hallam e Spencer (2013b), Gocke, Rust e Rust (2018).

Ao longo do período de monitoramento, os exemplares da espécie *Handroanthus serratifolius* apresentaram inclinação média da placa de raízes em 51,46% do tempo, os de *Lagerstroemia speciosa* 42,53%, *Caesalpinia peltophoroides* 30,39%, *Handroanthus impetiginosus* 8,74%, *Libidibia ferrea* 8,72%, *Licania tomentosa* 8,38%, *Delonix regia* 5,96%, *Spathodea campanulata* 5,56% e os de *Ceiba speciosa* 0,41%.

Ainda que a espécie *Lagerstroemia speciosa* tenha apresentado maior ângulo de inclinação na placa de raízes, observado anteriormente, os indivíduos de *Handroanthus serratifolius* obtiveram mais eventos de inclinação na base do tronco, seguidos de *Lagerstroemia speciosa* e *Caesalpinia peltophoroides*.

Levando em consideração que indivíduos que oscilam mais possivelmente são menos estáveis, as espécies que obtiveram melhores resultados quanto à estabilidade foram *Ceiba*

*speciosa*, seguida de *Spathodea campanulata* e *Delonix regia*, o que pode ter relação com sua característica de copa. Tais espécies correspondem justamente aos indivíduos com maior volume de copa amostrado, o que vai de encontro ao que foi discutido anteriormente, em que esta é uma característica de forte correlação com estabilidade. Segundo James, Haritos e Ades (2006), a estabilidade mecânica de uma árvore é sua capacidade de suportar e se adaptar às forças externas que ocorrem ao longo de sua vida.

Em ventos fortes e tempestades, quanto menos energia for transferida do vento para a árvore, maior a chance de sobrevivência deste indivíduo. As copas das árvores reduzem a transferência da energia que é propagada para o fuste e minimizam a ocorrência de arrasto através do amortecimento dinâmico de massa da copa. Tais resultados concordam com o que James, Haritos e Ades (2006) encontraram no seu trabalho, quando constataram que predominantemente as árvores que apresentaram menor número de oscilação na placa de raízes foram aquelas com maiores dimensões de copa.

Ao analisar o valor de inclinação, *Lagerstroemia speciosa* foi a espécie com maior destaque, contudo, na análise do número de ocorrências de inclinação, em porcentagem de tempo, *Handroanthus serratifolius* foi a que apresentou maior ocorrência de eventos. Assim, embora não tenha apresentado o maior valor de inclinação, foi a espécie que oscilou mais vezes durante o período monitorado, o que também pode acarretar menor estabilidade. Esse resultado demonstra que o valor de inclinação e a quantidade de eventos de inclinação não devem ser avaliados isoladamente para caracterizar a estabilidade de uma árvore, pois em conjunto fornecem resultados mais satisfatórios.

## 4.2 INFLUÊNCIA DA PODA NA INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES

### 4.2.1 Inclinação da placa de raízes para diferentes espécies

Com o objetivo de desobstruir e minimizar o conflito com a rede de energia aérea é frequente a realização de podas nas árvores, que muitas vezes alteram significativamente a forma e aparência de suas copas. Visando analisar o impacto dessas podas sobre a ancoragem das árvores foram selecionadas quatro condições, copa natural e copas com poda direcional, sendo elas: poda em L, poda unilateral e poda em V. Tais condições foram analisadas em indivíduos arbóreos pertencentes às espécies *Caesalpinia peltophoroides*, *Delonix regia* e *Licania tomentosa* (Tabela 3).

Tabela 3: Inclinação máxima e média da placa de raízes em diferentes tipos de copa

Copa	Espécie	Inclinação por indivíduo		Inclinação por espécie		Inclinação por tipo de poda				
		Imed	Imax	Imed	Imax	Imed	Imax			
NAT	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,0252	0,2495	0,0252	0,2495	0,0252	0,3453			
		0,0206	0,6254							
	<i>Delonix regia</i>	0,0243	0,1100	0,0232	0,3500					
		0,0302	0,5589							
		0,0176	0,1059							
	<i>Licania tomentosa</i>	0,0344	0,7886	0,0265	0,3581					
		0,0241	0,2027							
		0,0192	0,1000							
		0,0235	0,5282							
		0,0352	0,3727							
	L	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,0561	0,9034	0,0561			0,9034	0,0319	0,3378
			0,0205	0,1067						
<i>Delonix regia</i>		0,0276	0,2930	0,0287	0,3069					
		0,0381	0,5212							
<i>Licania tomentosa</i>		0,0294	0,1816	0,0269	0,1800					
		0,0216	0,1909							
UNI	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,0641	1,0473	0,0641	1,0473	0,0268	0,3383			
		0,0185	0,1318							
	<i>Delonix regia</i>	0,0269	0,3675	0,0214	0,3021					
		0,0190	0,4071							
	<i>Licania tomentosa</i>	0,0178	0,0713	0,0196	0,1380					
		0,0239	0,2767							
V	<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,0171	0,0661	0,0261	0,3285	0,0270	0,3865			
		0,0261	0,3285							
	<i>Delonix regia</i>	0,0287	0,3491	0,0289	0,4103					
		0,0360	0,7657							
	<i>Licania tomentosa</i>	0,0221	0,1162	0,0254	0,3820					
		0,0244	0,3497							
		0,0296	0,2863	0,0222	0,5099					
		0,0222	0,5099							
Média total		0,0286	0,3463							

NOTA: Imed - Inclinação média; Imax – Inclinação máxima; NAT – Copa natural; L – Poda em L; UNI – Poda Unilateral; V – Poda em V.

Dentre as condições de copa analisadas a maior inclinação média foi observada para poda em L, 0,0319°. Já a menor foi na copa natural, 0,0252°. Para a inclinação máxima o

maior valor encontrado foi na poda em V ( $0,3865^\circ$ ) e a menor inclinação foi para a poda em L ( $0,3378^\circ$ ).

A espécie que apresentou maior inclinação média e máxima foi *Caesalpinia peltophoroides*,  $0,0641^\circ$  e  $1,0473^\circ$ , respectivamente, na poda unilateral. Já a de menor inclinação média e máxima foi *Licania tomentosa* na poda unilateral ( $0,0196^\circ$  e  $0,1380^\circ$  respectivamente).

Quanto aos exemplares com simetria na copa, a espécie que apresentou menor inclinação média foi *Delonix regia* ( $0,0232^\circ$ ) e a menor inclinação máxima *Caesalpinia peltophoroides* ( $0,2495^\circ$ ). Para as demais condições de copa, *Licania tomentosa* foi a espécie que apresentou menores valores tanto de inclinação média quanto máxima, exceto na poda em V para inclinação máxima, onde a espécie *Caesalpinia peltophoroides* apresentou menor valor. Apesar de apresentar a maior inclinação da placa de raízes em uma das podas direcionais, a unilateral, observou-se uma boa resposta da espécie *Caesalpinia peltophoroides* à realização da poda em V, possivelmente devido à sua arquitetura de copa que permite a realização deste tipo de poda com uma menor interferência no equilíbrio da árvore (OLIVEIRA et al., 2015).

*Licania tomentosa* foi a espécie que apresentou maior inclinação em condição de copa natural e menor inclinação em ocorrência de podas, seguida pela espécie *Caesalpinia peltophoroides*. Tal resultado chama atenção, uma vez que contrapõem ao que se esperava. No estudo realizado em 35 cidades de Minas Gerais as espécies *Licania tomentosa* e *Caesalpinia peltophoroides* foram classificadas como as mais conflituosas no ambiente urbano, devido ao porte inadequado sob fiação (OLIVEIRA et al., 2015). Desta maneira, por gerarem conflito, acabam sofrendo mais intervenções de podas, ficando frequentemente sujeitas a deformações de copa. E este comprometimento da copa é normalmente associado às piores condições de troncos, afetando a integridade e sustentação das árvores (SALVI et al., 2011).

Os menores valores de inclinação observados para indivíduos de *Licania tomentosa* em situações de poda podem indicar que a espécie responde melhor a este tipo de intervenção, uma vez que sua estabilidade não foi prejudicada. Característica, esta, fundamental para árvores que precisam conviver com as podas. A realização de podas direcionais foi uma alternativa necessária adotada pelas concessionárias de energia no Brasil para minimizar os danos ocasionados pelo destopo, além de serem consideradas menos prejudiciais e já serem utilizadas nos Estados Unidos há mais de 30 anos (OLIVEIRA et al., 2015). Porém, é preciso

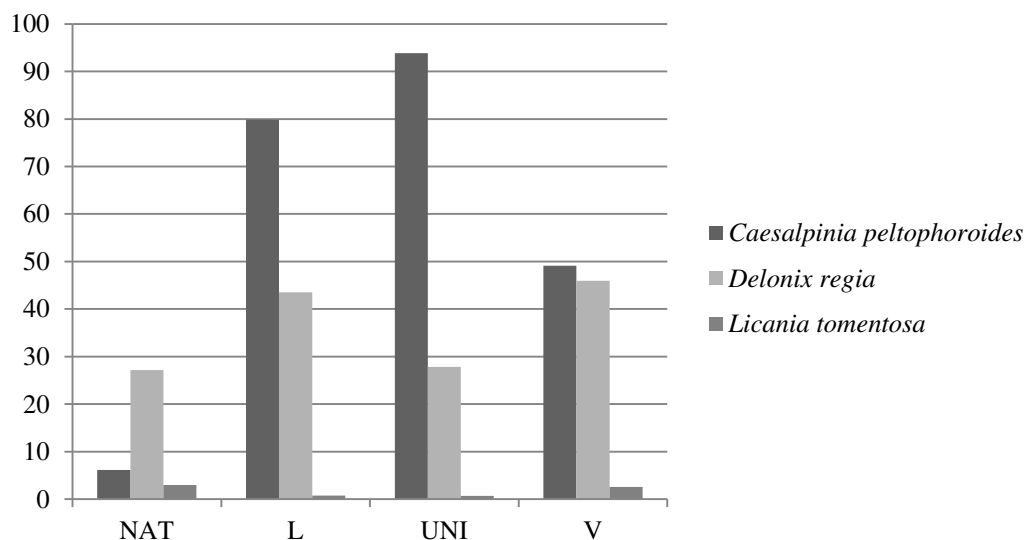
levar em conta que a padronização do formato das podas, pode não ser interessante, pois quando se trata de espécies com diferentes arquiteturas de copa, a área de contato com o vento é distinta e, portanto, a massa de remoção de galhos se torna uma consideração importante, que precisa ser tratada de maneira diferente entre elas, visando não interferir de maneira negativa no equilíbrio da árvore (JAMES; HARITOS; ADES, 2006).

Não existiam no Brasil registros da interferência de podas direcionais na inclinação da placa de raiz para espécies utilizadas na arborização. Com esta análise foram encontrados indícios do comportamento de estabilidade entre árvores com copa natural e submetidas a diferentes tipos de poda. Assim, de maneira geral, foi possível notar uma estabilidade maior nos indivíduos que não foram submetidos à poda. Além disso, foi observado que diferentes tipos de poda não prejudicaram a estabilidade de *Licania tomentosa* e que *Caesalpinia peltophoroides* mantem-se estável com a realização da poda em V.

#### 4.2.2 Número de ocorrência de inclinação por espécie

A contabilização de ocorrências de inclinação permitiu constatar quantas vezes cada espécie arbórea oscilou em resposta a episódios de vento por intervalo de tempo. Assim, a porcentagem de tempo com inclinação foi obtida para cada espécie, para os tipos de copa natural, poda em L, em V e unilateral (Figura 9).

Figura 9 - Porcentagem de tempo com ocorrências de inclinação para cada espécie separados por tipo de poda – Copa natural (NAT), poda em L (L), Unilateral (UNI) e poda em V (V)



Fonte: A autora (2019).

Ao longo do período de monitoramento, os exemplares de copa natural apresentaram inclinação da placa de raízes em 12,11% do tempo, os de poda em L em 41,37%, unilateral 40,8% e poda em V, 32,57%. Pode-se observar que o tipo de poda unilateral e em L obtiveram mais eventos de inclinação da placa de raízes do que os demais. Tais tipos de poda são os que proporcionam maior desequilíbrio de copa, uma vez que a poda em V tende a manter dois lados da árvore com a mesma proporção de massa vegetal.

Sabe-se que a realização de podas afeta a carga do vento em uma árvore, mas a forma como isso afeta a estabilidade ainda não é totalmente compreendido. Acredita-se, no entanto, que a poda direcional não afeta em grandes proporções a taxa de amortecimento até que metade da área da copa seja removida (MAYHEAD, 1973), conforme observado.

Na espécie *Licania tomentosa* foi possível observar menos eventos de inclinação da placa de raízes em todos os tipos de copa. Já a espécie que mais apresentou ocorrências de inclinação da placa de raízes, independentemente do tipo de poda foi *Caesalpinia peltophoroides*, com exceção da copa natural, na qual a espécie *Delonix regia* obteve mais ocorrências. É importante salientar, neste caso, que não houve repetições para a espécie *Caesalpinia peltophoroides*, desta maneira, os valores estão baseados em apenas um indivíduo para cada tipo de poda, o que não confere a representatividade mínima adequada. Mesmo assim, é possível inferir que *Caesalpinia peltophoroides*, por apresentar menores dimensões de diâmetro e volume de copa dentre os indivíduos amostrados neste estudo, teve um número maior de eventos de inclinação em todos os tipos de poda.

A relação entre as dimensões da copa e a oscilação, sob influência de poda já foi observada em estudos anteriores. Milne (1991), já afirmou que a redução da copa, após a remoção dos galhos, aumentava a frequência de oscilação das árvores. Segundo Santos et al. (2015) isso pode ser explicado pela reação a uma remoção de galhos inadequada, que pode provocar um desequilíbrio causando perda do sistema radicular proporcional à perda de copa.

A redução da copa, no entanto, não é o único fator que interfere na diferença entre as espécies. Segundo Mayhead (1973), diferenças de oscilações entre espécies podem ocorrer devido à variação de diversos fatores, como: forma e flexibilidade dos galhos, comprimento da copa e fator de forma. Segundo Ribeiro (2015), a arquitetura da árvore pode alterar a magnitude espacial de distribuição da carga resultante do vento. Tais fatores são severamente afetados pelas podas, assim é possível encontrar comportamento diferente aos apresentados pelas espécies em condições normais.

A realização desta análise não permitiu definir uma tendência de comportamento quanto ao tipo de poda, pois houve variação entre as espécies. Contudo, o menor número de ocorrência de inclinação para todas as espécies foi encontrado na condição de simetria de copa.

#### 4.2.3 Diferença estatística entre os tipos de poda

Os resultados da comparação entre a inclinação da placa de raízes de árvores que possuem copa natural com árvores que apresentam copa de podas em L, V e Unilateral comprovam estatisticamente que as podas interferem na condição de ancoragem das árvores (Tabela 4).

Tabela 4: Análise estatística das variáveis de inclinação para os diferentes tipos de poda (Teste F e Teste t)

	Poda em L				Poda em V				Poda Unilateral			
	Sem	Com	Teste F	Teste t	Sem	Com	Teste F	Teste t	Sem	Com	Teste F	Teste t
Inclinação Média	0,0284	0,0421	0,253 <sup>ns</sup>	-116,99**	0,0273	0,0307	0,769 <sup>ns</sup>	-54,03**	0,0290	0,0493	0,199 <sup>ns</sup>	-133,89**
Inclinação Máxima	0,4001	0,3377	0,882*	0,4235 <sup>ns</sup>	0,3776	0,3865	0,958*	-0,0825 <sup>ns</sup>	0,2956	0,3382	0,632*	-0,2587 <sup>ns</sup>
Número de ocorrências	29.813	65.650	0,349*	-0,9932 <sup>ns</sup>	38.768	60.065	0,462*	-0,6607 <sup>ns</sup>	23.420	47.142	0,408*	-0,6683 <sup>ns</sup>

NOTA: \*\* Significativo a nível de 1% de probabilidade de erro, \* Significativo a 5% e <sup>ns</sup> não significativo; Sinais negativos indicam relação inversa entre as variáveis.

Por meio do teste f, onde se compara as variâncias para os diferentes tipos de podas, podemos observar que houve diferença significativa para inclinação máxima e número de ocorrências, ao nível de 5% de significância para todos os tipos de poda, o que indica que as amostras têm variâncias diferentes. Segundo a análise estatística somente os valores para inclinação média foram significativos para todos os tipos de poda, ao nível de 1% de significância, indicando existir diferença entre os valores médios de inclinação para a condição de árvores sem poda e de árvores com diferentes tipos de poda.

A inclinação média da árvore com poda unilateral foi 0,0203° maior do que a de copa natural, para a poda em L esse valor foi de 0,0137° e para poda em V, 0,0034°. Quanto à inclinação máxima, as árvores com a copa natural apresentaram maiores valores do que as de poda em L (0,0624° maior). Já as árvores com poda unilateral tiveram valores de inclinação máxima 0,0426° maior do que as de copa natural e as de poda em V, 0,0089°. O número de ocorrências de inclinação foi maior em 45% na poda em L, 50% na poda unilateral e 64,5% na poda em V, quando comparados com a copa natural.

Nos três tipos de poda em L, V e Unilateral observou-se mais eventos de inclinação da placa de raízes em árvores com poda do que em árvores sem poda. Dentre estas, o indivíduo com poda em L apresentou mais eventos de inclinação. Comparando a inclinação média dos diferentes tipos de poda, indivíduos com poda unilateral apresentaram maior valor de inclinação, considerados mais instáveis, seguido da poda em L e para os ângulos de inclinação máxima árvores com poda em V oscilaram mais seguidos da poda Unilateral.

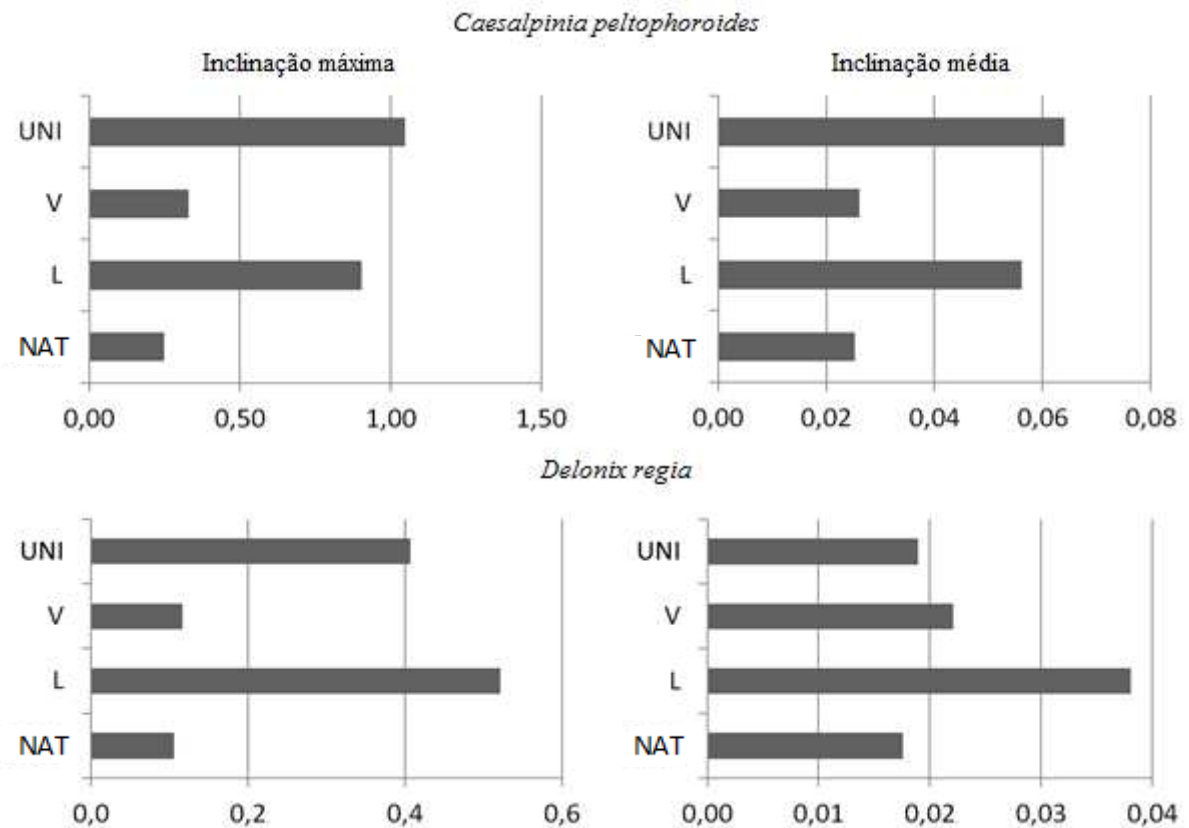
Os resultados foram significativamente mais expressivos na análise de inclinação média, justamente a variável que garante maior confiabilidade no estudo. Isto porque, a análise estatística desta variável contempla todo o conjunto de dados obtidos, em média noventa mil valores por tipo de poda. Já a variável inclinação máxima tem sua média estabelecida por um único valor máximo encontrado para cada indivíduo, por tipo de poda, abrangendo, neste caso, um conjunto de quatorzes valores. O mesmo se repete para a variável número de ocorrências. Desta forma, com base na inclinação média, é possível afirmar que todos os tipos de poda proporcionam uma condição de ancoragem estatisticamente diferente, sendo que a copa natural (sem poda) gera maior estabilidade. Dentre os tipos de poda, a unilateral foi a que apresentou menor estabilidade, seguida pela poda em L e V.

Em pesquisa realizada em Oregon nos Estado Unidos por Moore e Maguire (2004) observou-se que a oscilação das árvores após sofrerem redução da copa foi maior do que quando estavam com a copa intacta. Este aumento da oscilação foi possivelmente devido à diminuição do amortecimento aerodinâmico proporcionado pela copa a uma determinada condição de vento. Outro ponto é o apodrecimento de algumas raízes em consequência da realização de podas intensas, servindo de fonte de alimento e abrigo para cupins, podendo causar um consequente desequilíbrio e alto risco de queda dessas árvores (PEREIRA et al. 2011).

#### **4.2.4 Análise em condição simultânea de monitoramento**

Em duas espécies, *Caesalpinia peltophoroides* e *Delonix regia*, foi possível realizar a coleta de dados dos indivíduos simultaneamente, entre os diferentes tipos de copa, garantido semelhança na condição de vento (Figura 10).

Figura 10 - Inclinação máxima e média da placa de raízes em diferentes formatos de copa para as espécies *Caesalpinia Peltophoroides* e *Delonix Regia*.



Fonte: A autora (2019).

Na análise de *Caesalpinia peltophoroides* é possível observar que a árvore de copa natural obteve grau de inclinação máximo e médio inferior aos outros tipos de poda, seguido das podas em V, L e unilateral, nessa sequência.

A espécie *Delonix regia* obteve menores ângulos de inclinação máxima para a copa natural em relação às outras copas, seguido das podas em V, unilateral e em L. Para a inclinação média houve uma alteração na ordem, no qual, observou-se o menor ângulo de inclinação também para a copa natural, porém a poda unilateral foi menor que a poda em V e L.

Os menores valores de inclinação encontrados para copa natural eram esperados, porque sabe-se que, quando há uma poda direcional, há chances de uma transferência de massa, fazendo com que a copa tenda para algum dos lados, desequilibrando a árvore. Já, o fator que possivelmente explica a menor máxima e média da poda em V na espécie *Caesalpinia peltophoroides*, conforme já apontado anteriormente, deve-se a uma boa resposta da espécie para essa modalidade de poda. Segundo Oliveira et al. (2015), esta espécie apresenta arquitetura que permite a realização deste tipo de interferência, a poda em V.

A resposta de inclinação da placa de raiz entre os tipos de poda variou sob a mesma condição de vento, indicando que a ancoragem no solo e as propriedades estruturais de cada tipo de poda são diferentes (JAMES; HALLAM; SPENCER, 2013b). Entretanto, observou-se que o tipo de poda em V teve a menor inclinação máxima para as duas espécies. Isto porque, se trata do tipo de poda que menos interfere no balanceamento estrutural da árvore, mantendo os dois lados com a mesma carga.

A poda unilateral foi a que provocou maior inclinação em *Caesalpinia peltophoroides* e um valor significativo também em *Delonix regia*. Esses valores de inclinação mais acentuados na poda unilateral, poda em que há eliminação de aproximadamente 50% da copa como um todo, apontam para a importância de se manter as copas com a arquitetura característica da espécie, haja visto que a realização de podas, provavelmente, desloca o centro de massa da copa para alguma direção, afetando o equilíbrio da árvore (PEREIRA et al., 2011). Já para a espécie *Delonix regia* a poda em L, seguida da unilateral, foram as que provocaram maior inclinação máxima no indivíduo. Uma possível explicação é que devido a sua arquitetura de copa, mais acentuada na horizontal e oblíqua, faz com que quando realizada a poda em L, a copa fica com uma desproporção de massa significativa entre os lados, assemelhando-se à poda unilateral.

A análise realizada simultaneamente, para garantir a mesma condição de vento, permite confirmar os resultados anteriores. A copa natural proporcionou maior estabilidade para as espécies e dentre os tipos de poda direcional, a poda em V ligeiramente oferece condições de estabilidade melhores do que as demais.

### 4.3 INCLINAÇÃO DA PLACA DE RAÍZES EM DIFERENTES CONDIÇÕES DE CANTEIRO

#### 4.3.1 Comportamento em canteiro restrito

A maneira mais eficiente de evitar problemas com as raízes de uma árvore é a adequação do espaço para seu desenvolvimento, de forma a evitar que entrem em conflito com equipamentos urbanos e afetem a ancoragem das raízes. Interferências urbanas, como o tamanho dos canteiros e as calçadas, afetam o desenvolvimento das árvores tornando os exemplares possivelmente mais frágeis do que os encontrados no hábitat natural. Visando analisar o impacto sobre a estabilidade das árvores em canteiros restritos foram comparadas as espécies *Spathodea campanulata*, *Lagerstroemia speciosa*, *Handroanthus serratifolius*, *Licania tomentosa* e *Caesalpinia peltophoroides* em condição ideal de plantio e em canteiro restrito (Tabela 5).

Tabela 5: Inclinação das árvores em situações de canteiro ideal e restrito

ESPÉCIE	Imax		Imed		Número de observações (%)	
	Ideal	Restrito	Ideal	Restrito	Ideal	Restrito
<i>Spathodea campanulata</i>	0,2381	0,7655	0,0280	0,0294	12,78	17,35
	0,1054	0,1514	0,0380	0,0248	1,03	0,41
	0,1355	0,3084	0,0198	0,0257	2,63	14,81
<i>Lagerstroemia speciosa</i>	1,4595	1,1013	0,0526	0,0572	75,62	88,77
	0,2805	0,8973	0,0336	0,0503	17,20	75,62
	0,1090	1,1698	0,0397	0,0502	4,22	80,98
<i>Licania tomentosa</i>	0,1031	0,1371	0,0401	0,0372	0,97	4,74
	0,0690	0,1896	0,0280	0,0416	0,44	3,35
	0,1988	0,2587	0,0453	0,0296	11,64	11,60
<i>Handroanthus serratifolius</i>	0,1140	0,2970	0,0237	0,0268	1,48	25,31
	0,7738	0,1008	0,0439	0,0357	71,32	0,29
<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,1972	0,1381	0,0245	0,0223	0,32	11,79
<b>Média</b>	<b>0,3153</b>	<b>0,4596</b>	<b>0,0348</b>	<b>0,0359</b>	<b>16,64</b>	<b>27,9</b>

Ideal – Canteiro ideal; Restrito – Canteiro restrito; Imax – Inclinação máxima; Imed - Inclinação média.

A inclinação máxima e média em canteiro restrito foi maior do que em condições ideais. Sendo que a inclinação máxima em condição ideal variou de  $0,0690^\circ$  a  $1,4595^\circ$  entre os indivíduos e para canteiro restrito, de  $0,1008^\circ$  a  $1,1698^\circ$ . Já a inclinação média em condição ideal foi de  $0,0198^\circ$  a  $0,0526^\circ$  e canteiro restrito de  $0,0223^\circ$  a  $0,0572^\circ$ .

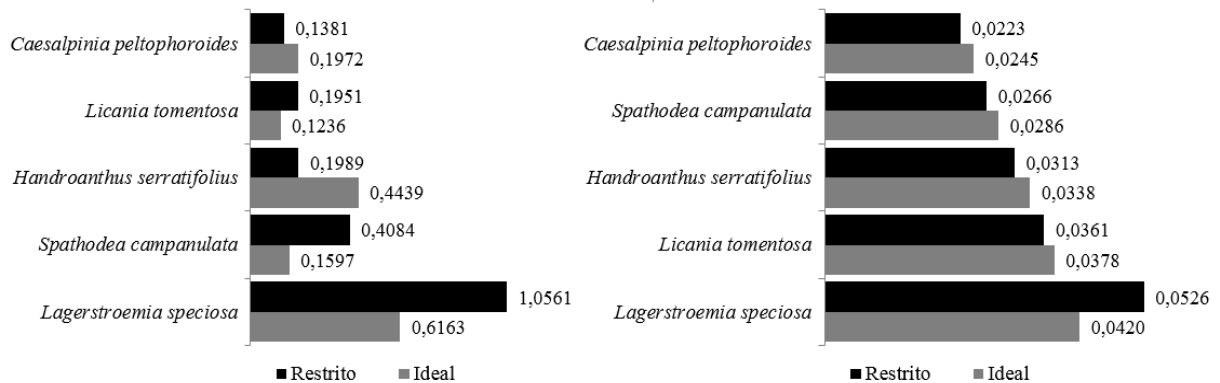
A ocorrência de eventos de inclinação da placa de raízes em condições ideais foi observada em 16,64% do tempo de monitoramento e para canteiro restrito em 27,9%. Desta maneira, exemplares em condições de canteiro restrito obtiveram mais eventos de inclinação da placa de raízes do que os em condições ideais de plantio. O máximo valor de ocorrências em condições ideais atingiu 75,62% e para o canteiro restrito, 88,77%, ambas situações pertencentes à indivíduo da espécie *Lagerstroemia speciosa*.

Os registros foram obtidos em condições normais de vento, no qual se constatou que indivíduos situados em canteiros restritos oscilam mais que os indivíduos em condições ideais. Era esperado que árvores em condições de canteiro restrito fossem mais instáveis quando comparadas a árvores em condições ideais de plantio. Segundo Ghani, Stokes e Fourcaud (2009) as árvores que crescem em ambientes construídos muitas vezes têm apenas espaços restritos para o seu desenvolvimento, além de serem plantadas em condições de solo não ideais, resultando em sistemas radiculares rasos e/ou deformados, o que prejudica o desenvolvimento das árvores, comprometendo sua ancoragem e equilíbrio.

Esse tipo de plantio restrito, em que não há nenhum espaço entre o tronco e a benfeitoria, ocasiona outro problema, o afloramento das raízes de forma aérea que se manifesta em solos impermeabilizados, acarretando em um dos maiores problemas causados pelas raízes, o levantamento de calçadas (OLIVEIRA et al., 2017).

Por isso, definir o comportamento de inclinação da placa de raízes em canteiros restritos e em condições ideais permite estabelecer uma relação que pode ser utilizada como referência para análises futuras quanto à estabilidade das árvores em diferentes condições de canteiro. O gráfico a seguir apresenta a média da inclinação máxima que cada espécie atingiu no período de monitoramento e a inclinação média encontrada para as espécies analisadas, visto que, o valor apresentado por um único indivíduo nem sempre é significativo (Figura 11).

Figura 11 - Inclinação máxima (esquerda) e média (direita) da placa de raízes em canteiro ideal e restrito



Fonte: A autora (2019)

Para a inclinação máxima, observa-se que a maioria das espécies apresentaram valores de inclinação superiores no canteiro restrito do que em condição ideal, foram estas as espécies *Licania tomentosa*, *Spathodea campanulata* e *Lagerstroemia speciosa*. Para a inclinação média isto ocorreu apenas para *Lagerstroemia speciosa*.

Tanto para a inclinação da placa de raízes máxima quanto média, observou-se que a espécie *Lagerstroemia speciosa* se destacou das demais, apresentando maiores valores. Já *Caesalpinia peltophoroides* foi a espécie que apresentou os menores valores para canteiro restrito.

As espécies *Licania tomentosa* e *Spathodea campanulata* foram as únicas que apresentaram comportamento diferente entre os valores de inclinação máxima e média, onde a condição ideal apresentou menores valores do que o canteiro restrito para a variável inclinação máxima e maiores valores para inclinação média.

A partir dos resultados obtidos observou-se um predomínio de inclinação maior para árvores em condições ideais de plantio, este resultado inesperado pode estar relacionado à exposição dessas árvores ao vento. Embora tenha se buscado analisar espécies próximas umas das outras, é importante destacar que as interferências externas em ambientes urbanos são muitas, tornando impossível o controle desses fatores, o que possivelmente pode ter influenciado no resultado encontrado.

Segundo Peterson e Claassen (2013), embora se espere que árvores em ambientes abertos tenham uma maior estabilidade, também foi observado estabilidade semelhante entre indivíduos situados em diferentes condições (plantações ou florestas), o que pode ser explicado devido às interferências externas, como as condições de compactação e umidade do solo. Desta maneira, a necessidade de abordar as interferências advindas dos componentes externos urbanos é importante a fim de melhorar o entendimento sobre a vulnerabilidade de distúrbios por vento ocasionados em indivíduos arbóreos.

A análise geral realizada entre canteiro ideal e restrito demonstrou que as árvores plantadas em canteiro restrito apresentam menor estabilidade, o que foi evidenciado em todas as variáveis analisadas, inclinação máxima, média e porcentagem de ocorrência. No entanto, ao fazer uma análise detalhada por espécie, este comportamento não foi tão evidente, ocorrendo certas situações onde a inclinação foi ligeiramente maior no plantio em condições ideais.

#### 4.3.2 Comportamento em canteiro intermediário

Uma alternativa para o plantio de espécies arbóreas nos centros urbanos são os canteiros intermediários, que diferentemente dos canteiros restritos, fornecem área livre de pavimentação no entorno das árvores. Neste tópico a condição de plantio ideal das espécies *Caesalpinia peltophoroides*, *Ceiba speciosa*, *Delonix regia*, *Handroanthus impetiginosus*, *Lagerstroemia speciosa* e *Licania tomentosa* foi comparada simultaneamente com a condição de canteiro intermediário, visando analisar se este tipo de canteiro interfere na estabilidade das árvores (Tabela 6).

Tabela 6: Inclinação da placa de raízes das árvores em situações de canteiro ideal e intermediário

ESPÉCIE	Imax		Imed		Número de observações (%)	
	Ideal	Intermed	Ideal	Intermed	Ideal	Intermed
<i>Caesalpinia peltophoroides</i>	0,0978	0,2108	0,0165	0,0167	0,18	0,25
	0,1754	0,1160	0,0340	0,0230	1,67	1,24
	0,1227	0,0761	0,0224	0,0167	0,18	0,06
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	0,1642	0,1051	0,0461	0,0328	12,28	2,84
	0,3416	0,2167	0,0314	0,0357	7,31	3,41
	0,2155	0,0629	0,0400	0,0244	4,03	0,06
<i>Licania tomentosa</i>	0,2297	0,2297	0,0380	0,0297	12,73	2,58
	0,1455	0,7886	0,0405	0,0344	3,95	0,34
	0,0938	0,4998	0,0304	0,0540	1,37	52,94
<i>Ceiba speciosa</i>	0,0626	0,1374	0,0142	0,0188	0,18	0,19
<i>Delonix regia</i>	0,1067	0,6254	0,0205	0,0207	13,58	0,42
<i>Lagerstroemia speciosa</i>	1,4052	1,9119	0,0785	0,1110	29,22	27,12
Média	0,2634	0,4150	0,0344	0,0348	7,22	7,62

Ideal – Canteiro ideal; Intermed – Canteiro intermediário; Imax – Inclinação máxima; Imed - Inclinação média.

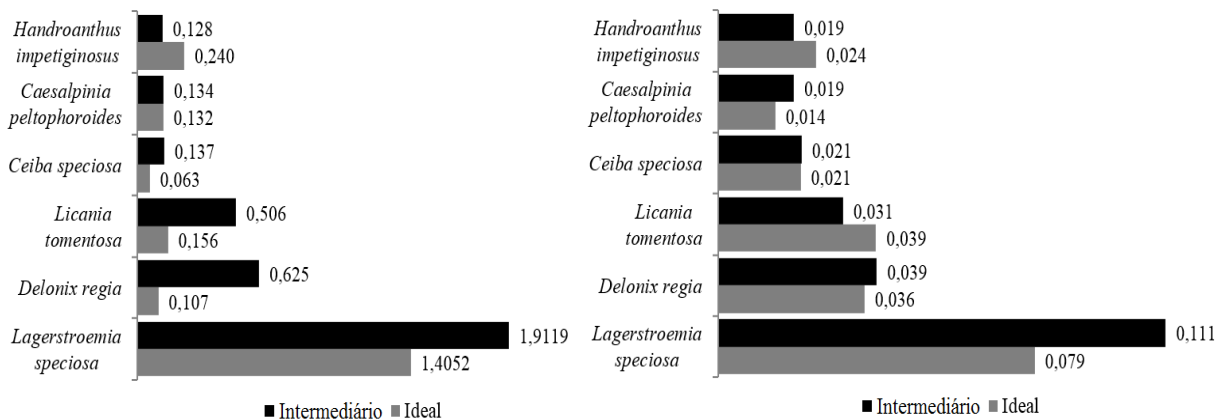
A inclinação máxima em condição ideal variou de  $0,0626^\circ$  a  $1,4052^\circ$  e para canteiro intermediário de  $0,0629^\circ$  a  $1,9119^\circ$ . Já a inclinação média em condição ideal variou de  $0,0142^\circ$  a  $0,0785^\circ$  e de  $0,0167^\circ$  a  $0,1110^\circ$  para canteiro intermediário. No geral, a inclinação máxima e média, da placa de raízes foi menor em condições ideais.

Ao longo do período de monitoramento o número de eventos de inclinação da placa de raízes em condições ideais foi observado em 7,22% do tempo e para o canteiro intermediário em 7,62%. Não observando grande variação para essa variável. A porcentagem máxima observada para o canteiro ideal foi de 29,22% e para o canteiro intermediário foi de 52,94%, pertencentes a indivíduos das espécies *Lagerstroemia speciosa* e *Licania tomentosa*, respectivamente.

Os resultados demonstram uma diferença expressiva entre a condição de plantio apenas na variável inclinação máxima, para as demais, embora o valor no canteiro intermediário tenha sido maior, essa diferença foi sutil. Uma possível explicação é que os exemplares em condições ideais de plantio podem ter sofrido mais influências do vento, pelo fato da maior parte dos indivíduos estarem situados em áreas abertas, enquanto que as árvores situadas em canteiros intermediários não sofriam ação direta do vento devido à proteção de outras árvores ou obstáculos urbanos, comuns na arborização de ruas e estacionamentos. Isto se dá pelo fato de que mesmo que as árvores comparadas estejam na mesma região, a intensidade do vento que chega a uma árvore pode diferir da outra analisada por causa dos efeitos de abrigo advindos de outra árvore ou da infra-estrutura, por exemplo (HALE et al., 2012; ESCHE; DETTER; RUST; 2018).

Analisar a diferença no comportamento de inclinação da placa de raízes em canteiros intermediários e em condições ideais permite estabelecer uma referência para análises futuras quanto à estabilidade das árvores em diferentes condições de canteiro. Por isso, uma análise mais minuciosa em nível de espécie torna-se importante. O gráfico a seguir apresenta a inclinação máxima que cada espécie atingiu no período de monitoramento e, visto que, o valor apresentado por um único indivíduo nem sempre é significativo analisou-se a média entre vários indivíduos das espécies estudadas (Figura 12).

Figura 12 - Inclinação máxima (esquerda) e média (direita) da placa da raíz em canteiro ideal e intermediário



Fonte: A autora (2019)

Para a inclinação máxima, cinco das seis espécies analisadas apresentaram valores de inclinação superiores nos canteiros intermediários do que nos exemplares em condições ideais de plantio. Foram estas, as espécies *Caesalpinia peltophoroides*, *Ceiba speciosa*, *Licania tomentosa*, *Delonix regia* e *Lagerstroemia speciosa*. Para a inclinação média, quatro das seis espécies analisadas obtiveram valores dos canteiros intermediários maiores que dos canteiros ideais, das citadas anteriormente apenas *Licania tomentosa*.

Canteiros restritos têm como característica o sufocamento de raízes, impermeabilização e problemas com quebras de calçadas. Desta maneira, uma alternativa para se obter o plantio de árvores em áreas urbanas é a ampliação dos canteiros intermediários, com maior espaço para o desenvolvimento do sistema radicular e permeabilidade para infiltração de água, permitindo uma melhor ancoragem no solo (Santos et al., 2015). Pereira et al. (2011), recomenda canteiros com áreas superiores a 1m<sup>2</sup>, variando de acordo com a necessidade de cada espécie, visando um bom desenvolvimento do sistema radicular, permitindo com que a árvore cresça de forma estável.

De maneira geral, a espécie *Lagerstroemia speciosa* apresentou os maiores valores dentre as outras espécies analisadas, tanto para a inclinação máxima quanto para a média, nas duas situações de plantio. Entretanto, *Handroanthus impetiginosus* foi a espécie que apresentou os menores valores de inclinação observado no canteiro intermediário, tanto para a inclinação máxima quanto para a média. Para o canteiro ideal o menor valor máximo de inclinação observado foi para a espécie *Ceiba speciosa* e para o valor médio, *Caesalpinia peltophoroides*.

Diferente do observado no canteiro restrito, a análise geral para o canteiro intermediário demonstrou uma relação menos expressiva do que o detalhamento por espécies.

Mesmo assim, foi possível constatar que as árvores plantadas em canteiros intermediários também apresentam menor estabilidade, resultado respaldado principalmente pela variável inclinação máxima. Tal comportamento se repetiu para a maioria das espécies.

#### 4.3.3 Diferença estatística entre as condições de canteiro

Os resultados da comparação entre a inclinação da placa de raízes em condições ideais com a inclinação em canteiro restrito e intermediário comprovam estatisticamente que a restrição imposta pelos canteiros interfere na condição de estabilidade das árvores (Tabela 7).

Tabela 7: Análise estatística das variáveis de inclinação para os diferentes tipos de condição de plantio (teste F e teste t)

	Intermediário				Restrito			
	Ideal	Canteiro	Teste F	Teste t	Ideal	Canteiro	Teste F	Teste t
<b>Inclinação Média</b>	0,0559	0,06117	0,728 <sup>ns</sup>	-18,620 <sup>**</sup>	0,0438	0,0470	0,736 <sup>ns</sup>	-33,159 <sup>**</sup>
<b>Inclinação Máxima</b>	0,2634	0,4150	0,487 <sup>*</sup>	-0,818 <sup>ns</sup>	0,3153	0,4595	1,013 <sup>ns</sup>	-0,872 <sup>ns</sup>
<b>Número de ocorrências</b>	12.444	19.453	0,289 <sup>ns</sup>	-0,621 <sup>ns</sup>	38.456	57.832	0,653 <sup>*</sup>	-0,713 <sup>ns</sup>

NOTA: \*\* Significativo a nível de 1% de probabilidade de erro, \* Significativo a 5% e <sup>ns</sup> não significativo; Sinais negativos indicam relação inversa entre as variáveis.

Por meio do teste F, é possível observar que houve diferença significativa ao nível de 5% de significância apenas para a inclinação máxima na condição de canteiro intermediário e número de ocorrências na condição de canteiro restrito. Para tais situações tem-se, portanto, variâncias diferentes entre as amostras, no restante, as variâncias são equivalentes.

Segundo a análise estatística somente os valores para inclinação média foram significativos para todos os tipos de canteiro, ao nível de 1% de significância, indicando existir diferença entre a média de inclinação da condição ideal de plantio para árvores em condição de canteiro intermediário e restrito.

A inclinação média em canteiro intermediário foi 0,0053° maior do que em condições ideais e 0,0032° em canteiro restrito. Quanto à inclinação máxima, as árvores em canteiro intermediário tiveram valores de inclinação 0,1516° maior e as do canteiro restrito, 0,1442°. O número de ocorrências de inclinação foi 64% maior no canteiro intermediário e 66,5% maior no canteiro restrito, quando comparados à condição ideal.

Mais uma vez a análise de inclinação média obteve resultados significativamente mais expressivos que a inclinação máxima. E pelo fato da análise estatística da inclinação

média contemplar todo o conjunto de dados obtidos é considerada uma variável que garante maior confiabilidade no estudo. Desta forma, com base na inclinação média, é possível afirmar que os canteiros restritos e intermediários proporcionam uma condição de estabilidade estatisticamente diferente da condição ideal, sendo que a condição ideal gera maior estabilidade.

A qualidade do sistema radicular das árvores é influenciada pelas condições do ambiente onde se encontram inseridas, destacando assim a importância das áreas permeáveis para as árvores em ambientes urbanos. Estas oferecem aos indivíduos condições adequadas para o desenvolvimento do sistema radicular e auxiliam na diminuição do aquecimento do solo, pois quanto maior a temperatura, menor é a capacidade de crescimento das raízes (MULLANEY; LUCKE; TRUEMAN; 2015; PEREIRA, 2017b).

## 5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa forneceu indícios de parâmetros de inclinação da placa de raízes, obtidas com o *Tree Motion Sensors*. Foram analisadas diferentes espécies em condições ideais de desenvolvimento, assim como a influência dos diferentes tipos de poda e das condições de canteiro. Destaca-se que, ainda não há no Brasil, para fins comparativos, estudos de inclinação da placa de raízes sob influência do vento.

A análise de inclinação da placa de raízes em condições ideais permitiu conhecer o comportamento de diferentes espécies utilizadas na arborização urbana. As inclinações máximas obtidas forneceram indícios de parâmetros que sugerem condição de estabilidade dessas espécies. Além disso, foi possível observar que árvores com maiores valores de DAP e diâmetro de copa apresentaram menores inclinações e, conseqüentemente, melhores condições de ancoragem.

A rajada de vento foi um fator expressivo determinante da inclinação máxima da placa de raízes, em que, aproximadamente, 51% dos elementos que influenciaram na inclinação foram explicados apenas por esta condição. Sobre a tendência do sentido de inclinação, a maioria das árvores apresentou inclinação sudoeste/nordeste, em resposta ao sentido dos ventos predominantes na região.

Ao analisar o valor de inclinação máxima, *Lagerstroemia speciosa* foi a espécie que apresentou maior inclinação, contudo, na análise do número de ocorrências de inclinação, *Handroanthus serratifolius* foi a que apresentou maior ocorrência de eventos. Embora não tenha apresentado o maior valor de inclinação, foi a espécie que oscilou mais vezes durante o período monitorado. Ressalta-se, no entanto, que a variável comumente analisada para inferir sobre a estabilidade das árvores tem sido a inclinação máxima da placa de raízes.

Quanto à análise da influência da poda na qualidade da ancoragem, observou-se que os menores valores de inclinação máxima e média, bem como o número de ocorrência foram menores nas árvores em condição natural de copa o que indica maior estabilidade em indivíduos que não foram submetidos à poda. Dentre os tipos de poda direcional, a poda unilateral foi considerada a menos estável, seguida da poda em L, sendo, portanto, a poda em V a mais favorável para manter boas condições de ancoragem. Os diferentes tipos de poda, no entanto, não prejudicaram a estabilidade de *Licania tomentosa*.

As árvores situadas em condições ideais, com dimensão ampla de espaço para o desenvolvimento de suas raízes, apresentaram melhores condições de ancoragem do que as árvores localizadas tanto em canteiros restritos quanto em intermediários.

Por fim, os resultados encontrados enfatizam a importância de se conhecer o comportamento de ancoragem das árvores urbanas, buscando minimizar os danos relacionados à queda de árvores. Fornecem indícios dos valores de inclinação da placa de raízes de árvores permitindo, comparar as melhores condições de canteiro para desenvolvimento de uma árvore em área urbana, avaliar o tipo de poda direcional que menos prejudicará a ancoragem e sugerir padrões que podem ser utilizados como referência para análises futuras quanto à estabilidade das espécies.

## REFERÊNCIAS

- ALLISON, R. B.; WANG, X. **Chapter 7: Nondestructive Testing in the Urban Forest | Treesearch. General Technical Report, FPL-GTR-238** 2015. p. 77-86. Disponível em: <<https://www.fs.usda.gov/treesearch/pubs/49380>>. Acesso em: 06 jul. 2019.
- AMATO-LOURENÇO, L. F.; MOREIRA, T. C. L.; ARANTES, B. L. D.; SILVA FILHO, D. F. D.; MAUAD, T. Metrôpoles, cobertura vegetal, áreas verdes e saúde. **Estudos avançados**, v. 30, n. 86, p. 113-130, 2016.
- APPLE, A. **Cidade de SP tem mais de 2 mil quedas de árvores em janeiro e fevereiro** . Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/03/05/cidade-de-sp-tem-mais-de-2-mil-quedas-de-arvores-em-janeiro-e-fevereiro.ghhtml>>. Acesso em: 14 jun. 2019.
- ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V.; ROCHA, P. A. B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha-São Paulo. **Revista Árvore**, v. 27, n. 2, p. 257-262, 2003.
- BENATTI, D. P., TONELLO, K. C., JÚNIOR, F. C. A., DA SILVA, J. M. S., DE OLIVEIRA, I. R., ROLIM, E. N., FERRAZ, D. L. Inventário arbóreo-urbano do município de Salto de Pirapora, SP. **Revista Árvore**, v. 36, n. 5, p. 887-894, 2012.
- BOBROWSKI, R. **Estrutura e dinâmica da arborização de ruas de Curitiba, Paraná, no período 1984-2010**. 2011. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- BOBROWSKI, R.; BIONDI, D. Distribuição e dinâmica da área de copa na arborização de ruas de Curitiba, Paraná, Brasil, no período de 1984-2010. **Revista Árvore**, v. 36, n. 4, p. 625-635, 2012.
- BRANDÃO, I. M.; GOMES, L. B.; DOS REIS SILVA, N. C. A.; FERRARO, A. C.; DA SILVA, A. G.; GONÇALVES, F. G.. Análise quali-quantitativa da arborização urbana do município de São João Evangelista-MG. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 6, n. 4, p. 158-174, 2011.
- BRAZOLIN, S. **Biodeterioração, anatomia do lenho e análise de risco de queda de árvores de tipuana, Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze, nos passeios públicos da cidade de São Paulo, SP**. 2009. 265 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.
- BRIANEZI, D.; JACOVINE, L. A. G.; GONÇALVES, W.; DA ROCHA, S. J. S. S. Avaliação da arborização no campus-sede da Universidade Federal de Viçosa. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, n. 4, p. 89–106, 2013.
- CANNON, J. B.; BARRETT, M. E.; PETERSON, C. J. The effect of species, size, failure mode, and fire-scarring on tree stability. **Forest Ecology and Management**, v. 356, p. 196-203, 2015.

CROCKFORD, R. H.; RICHARDSON, D. P. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. **Hydrological processes**, v. 14, n. 16-17, p. 2903-2920, 2000.

CUCCHI, V., MEREDIEU, C., STOKES, A., BERTHIER, S., BERT, D., NAJAR, M., LASTENNET, R. Root anchorage of inner and edge trees in stands of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) growing in different podzolic soil conditions. **Trees**, v. 18, n. 4, p. 460-466, 2004.

CUPERTINO, M. A.; EISENLOHR, P. V. View of Análise florística comparativa da arborização urbana nos campi universitários do Brasil. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 3, p. 739-750, 2013.

DA MATA ATAÍDE, G.; CASTRO, R. V. O.; CORREIA, A. C. G.; DOS REIS, G. G.; REIS, M. D. G. F.; ROSADO, A. M. Interação árvores e ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 523-536, 2015.

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

DA SILVA, D. A.; BIONDI, D., BATISTA, A. C.; RIOS, J. F.; BEHLING, A. Ocorrências de cortes de *Tipuana tipu* (Benth.) O. Kuntze com risco de queda nas ruas de Curitiba, Paraná. **Acta Biológica Catarinense**, v. 6, n. 4, p. 42-50, 2019.

DE MELO, R. R., DE LIRA FILHO, J. A., JÚNIOR, F. R. Diagnóstico qualitativo e quantitativo da arborização urbana no bairro Bivar Olinto, Patos, Paraíba. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 2, n. 1, p. 64-80, 2019.

DE OLIVEIRA, A. F.; PEREIRA, J. A. A.; COELHO, S. J.; DE ASSIS PEREIRA, G. Diagnóstico parcial da arborização viária sob rede elétrica na Regional Oeste de Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 36, n. 85, p. 31-40, 2016.

DORIGON, E. B.; PAGLIARI, S. C. Arborização urbana: importância das espécies adequadas. **Unoesc & Ciência-ACET**, v. 4, n. 2, p. 139-148, 2013.

DUARTE, T. E. P. N.; ANGEOLETTO, F.; SANTOS, J. W. M. C.; DA SILVA, F. F.; BOHRER, J. F. C.; MASSAD, L. Reflexões sobre arborização urbana: desafios a serem superados para o incremento da arborização urbana no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 11, n. 1, p. 327-341, 2018.

DUPONT, S.; DÉFOSSEZ, P.; BONNEFOND, J. M.; IRVINE, M. R.; GARRIGOU, D. How stand tree motion impacts wind dynamics during windstorms. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 262, p. 42-58, 2018.

ESCHE, V. D. . P. S.; DETTER, A.; RUST, S. Experimental Validation of the Wind Load Analysis in Static Load Tests. *In: Jahrbuch der Baumpflege - Yearbook of Arboriculture*. Alemanha. Haymarket Media, 2018. cap. 4, p. 229–236.

FERNANDES, J. S.; DE ASSIS PEREIRA, G.; NEVES, C. L. P.; REZENDE, S. W.; DE OLIVEIRA, A. F.; COELHO, S. J. Composição florística sob uma rede de circuitos elétricos da região sul do Estado De Minas Gerais. *In: Trabalhos apresentados nos Congressos Brasileiros de Arborização Urbana. Resumos [...]*. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2014.

FERREIRA, D. **Análise de risco de queda de árvores: a espécie *Tilia tomentosa* Moench no Parque dr. Manuel Braga, Coimbra/Portugal**. 2017. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Vida) - Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017).

FÓRNEAS, V. **Quedas de árvores aumentam devido às chuvas em BH; Pampulha lidera chamados**. Disponível em: <<https://bhaz.com.br/2019/02/07/queda-de-arvores-chuva-bh/>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

GALARÇA, S. P.; LIMA, C. S. M.; SILVEIRA, G. D.; RUFATO, A. D. R. Correlação de Pearson e análise de trilha identificando variáveis para caracterizar porta-enxerto de *Pyrus communis* L. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 4, p. 860-869, 2010.

GHANI, M. A.; STOKES, A.; FOURCAUD, T. The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). **Trees**, v. 23, n. 2, p. 197-209, 2009.

GÖCKE, L.; RUST, S.; RUST, F. Assessing the Anchorage and Critical Wind Speed of Urban Trees using Root-Plate Inclination in High Winds. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 44, n. 1, 2018.

GONÇALVES, R.; GARCIA, G. H. L.; BRAZOLIN, S.; BERTOLDO, C.; RUY, M. Methodology for the Characterization of Elastic Constants of Wood from Tree Branches. **BioResources**, v. 14, n. 4, p. 8439–8454, 2019.

GROHMANN, D.; PETRUCCI, R.; TORRE, L.; MICHELI, M.; MENCONI, M. E. Street trees management perspectives: Reuse of *Tilia* sp.'s pruning waste for insulation purposes. **Urban forestry & urban greening**, v. 38, p. 177-182, 2019.

GUIMARÃES, B.; DELGADO, C. **MEC libera R\$ 5 milhões para UFV após chuva destruir parte do campus e laboratórios**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2019/10/26/mec-libera-r-5-milhoes-para-ufv-apos-chuva-destruir-parte-do-campus-e-laboratorios.ghtml>>. Acesso em: 11 jan. 2020.

HALE, S. E.; GARDINER, B. A.; WELLPOTT, A.; NICOLL, B. C.; ACHIM, A. Wind loading of trees: influence of tree size and competition. **European Journal of Forest Research**, v. 131, n. 1, p. 203-217, 2012.

IBGE. **IBGE | Cidades@ | Minas Gerais | Viçosa | História & Fotos**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/vicosa/historico>>. Acesso em: 21 dez. 2019.

IBGE. **IBGE | Cidades@ | Minas Gerais | Viçosa | Panorama**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/mg/vicosa/panorama>>. Acesso em: 12 jan. 2019.

INMET. **INMET - Instituto Nacional de Meteorologia ::** Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesConvencionais>>. Acesso em: 12 set. 2019

- JAMES, K.; HALLAM, C.; SPENCER, C. Measuring tilt of tree structural root zones under static and wind loading. **Agricultural and forest meteorology**, v. 168, p. 160-167, 2013a.
- JAMES, K.; HALLAM, C.; SPENCER, C. Tree stability in winds: Measurements of root plate tilt. **Biosystems Engineering**, v. 115, n. 3, p. 324–331, 1 jul. 2013b.
- JAMES, K. R.; HARITOS, N.; ADES, P. K. Mechanical stability of trees under dynamics loads. **American journal of Botany**, v. 93, n. 10, p. 1522-1530, 2006.
- JIANG, B.; CHANG, C. Y.; SULLIVAN, W. C. A dose of nature: Tree cover, stress reduction, and gender differences. **Landscape and Urban Planning**, Amsterdã, v. 132, p. 26-36, 2014.
- KAMIMURA, K.; KITAGAWA, K.; SAITO, S.; MIZUNAGA, H. Root anchorage of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et Zucc.) Endl.) under the combined loading of wind and rapidly supplied water on soil: analyses based on tree-pulling experiments. **European Journal of Forest Research**, v. 131, n. 1, p. 219-227, 2012.
- LAURETT, L.; RIBEIRO, J. R. D.; CLEMES, M. N. O. Diagnóstico da arborização urbana da área central de Santa Maria de Jetibá, ES. **Revista Univap**, v. 22, n. 40, p. 119, 2016.
- LEAL, L.; PEDROSA-MACEDO, J. H.; BIONDI, D. Censo da arborização do campus iii-centro politécnico da Universidade Federal do Paraná. **Scientia Agraria**, v. 10, n. 6, p. 443-453, 2009.
- LEITÃO, F. DOS S. **A ATUAÇÃO PÚBLICA NA ARBORIZAÇÃO DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO**. 2016. 139 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- LIMA NETO, E. M. DE. **Índices e métricas para a gestão das árvores de rua de Boa Vista – RR a partir de cadastro espacial**. 2014. 168 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- LINDSEY, P.; BASSUK, N. Specifying soil volumes to meet the water needs of mature urban street trees and trees in containers. **Journal of Arboriculture**, V. 17, n. 6, p. 141-148, 1991.
- LORENZI, H.; SOUZA, H.M.; TORRES, M.A.V.; BACHER, L.B. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Nova Odessa: Plantarum, 2003. 368 p.
- LUNDSTRÖM, T.; JONSSON, M. J.; KALBERER, M. The root–soil system of Norway spruce subjected to turning moment: resistance as a function of rotation. **Plant and soil**, v. 300, n. 1-2, p. 35-49, 2007.
- MARIA, T. R. B D. C.; BIONDI, D.; ZAMPRONI, K. Proposta de calçadas acessíveis em consonância com a arborização viária estabelecida em Itanhaém–SP. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 12, n. 4, p. 87-101, 2018.
- MARTINI, A.; BIONDI, D.; BATISTA, A. C.; ZAMPRONI, K. A periodicidade diária do índice de conforto térmico na arborização de ruas de Curitiba-PR. **Scientia Plena**, v. 9, n. 5, 2013.

- MARTINS, L. F. V.; DE ANDRADE, H. H. B.; DE ANGELIS, B. L. D. Relação entre podas e aspectos fitossanitários em árvores urbanas na cidade de Luiziana, Paraná. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 4, p. 141-155, 2010.
- MATTHECK, C.; VORBERG, U. The biomechanics of tree fork design. **Botanica acta**, v. 104, n. 5, p. 399-404, 1991.
- MAYHEAD, G. J. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. **Agricultural Meteorology**, v. 12, p. 123-130, 1973.
- MENDES, F. H.; POLIZEL, J. L.; DA SILVA FILHO, D. F. O efeito do vento nas quedas de árvores em Piracicaba/SP. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1523-1535, 2016.
- MILNE, R. Dynamics of swaying of *Picea sitchensis*. **Tree physiology**, v. 9, n. 3, p. 383-399, 1991.
- MOORE, J. R.; MAGUIRE, D. A.. Natural sway frequencies and damping ratios of trees: concepts, review and synthesis of previous studies. **Trees**, v. 18, n. 2, p. 195-203, 2004.
- MUKAKA, M. M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. **Malawi medical journal**, v. 24, n. 3, p. 69-71, 2012.
- MULLANEY, J.; LUCKE, T.; TRUEMAN, S. J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 157-166, 2015a.
- MULLANEY, J.; LUCKE, T.; TRUEMAN, S. J. The effect of permeable pavements with an underlying base layer on the growth and nutrient status of urban trees. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 1, p. 19-29, 2015b.
- NETO, J. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005.
- NIELSEN, C. N. **Forest management for improved wind stability. Adaptive physiology and tree management**. Samfundslitteratur Life Sciences, Thorvaldsensvej Denmark, 2005.
- NIKLAS, K. J.; SPATZ, H. C.; VINCENT, J. Plant biomechanics: an overview and prospectus. **American journal of botany**, v. 93, n. 10, p. 1369-1378, 2006.
- NOCK, C. A.; GEIHOFFER, D.; GRABNER, M.; BAKER, P. J.; BUNYAVEJCHEWIN, S.; HIETZ, P. Wood density and its radial variation in six canopy tree species differing in shade-tolerance in western Thailand. **Annals of botany**, v. 104, n. 2, p. 297-306, 2009.
- OLIVEIRA, A. F.; PEREIRA, J. A. A.; PEREIRA, G. A.; COELHO, S. J.; NEVES, C. L. P.; REZENDE, S. W.; GARCIA, F. H. S. Modalidades de poda avaliadas na arborização viária sob rede elétrica no Estado de Minas Gerais. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 10, n. 2, p. 1-13, 2015.
- OLIVEIRA, L. M.; SANTOS, A. F.; SOUZA, P. A.; ALVES, K.C. C. L. F.; GIONDO, M. Diagnóstico da arborização nas calçadas de Gurupi, TO. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v.12, n.1, p.105-121, 2017.

OLIVEIRA, S., LOPES, A. Metodologia de avaliação do risco de queda de árvores devido a ventos fortes. O caso de Lisboa. In **CONGRESSO DA GEOGRAFIA PORTUGUESA**, Vol. 6, p. 1-21, 2007.

PAIVA, H. N.; GONÇALVES, W. **Florestas urbanas: planejamento para melhoria da qualidade de vida**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2002. 180 p.

PEREIRA, B. Análise dos efeitos do entorno urbano sobre o sistema radicular de árvores viárias de São Mateus do Sul - Paraná. 2017. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2017.

PEREIRA, G. de A. **Diagnóstico florístico da arborização urbana no Brasil e no município de Lavras – MG**. 2015. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

PEREIRA, P. H.; TOPANOTTI, L. R.; DALLACORT, S.; MOTA, C. J.; BRUN, F. G. K.; SILVA, R. T. L. Estudo de caso do risco de queda de árvores urbanas em via pública na cidade de Dois Vizinhos-PR. **Synergismus scyentifica**, v. 6, n. 1, p. 1-10, 2011.

PELTOLA, H.; KELLOMÄKI, S.; HASSINEN, A.; GRANANDER, M. Mechanical stability of Scots pine, Norway spruce and birch: an analysis of tree-pulling experiments in Finland. **Forest Ecology and Management**, v. 135, n. 1-3, p. 143-153, 2000.

PETERSON, C. J.; CLAASSEN, V. An evaluation of the stability of *Quercus lobata* and *Populus fremontii* on river levees assessed using static winching tests. **Forestry**, v. 86, n. 2, p. 201-209, 2013.

RAHARDJO, H.; GOFAR, N.; AMALIA, N.; LEONG, E. C.; OW, L. F. Structural cell contribution to resistance of trees to uprooting. **Trees**, v. 30, n. 5, p. 1843-1853, 2016.

RAHARDJO, H.; HARNAS, F. R.; INDRAWAN, I. G. B.; LEONG, E. C.; TAN, P. Y.; FONG, Y. K.; OW, L. F. Understanding the stability of *Samanea saman* trees through tree pulling, analytical calculations and numerical models. **Urban forestry & urban greening**, v. 13, n. 2, p. 355-364, 2014.

REIS, R. J. **Mapeamento a climatologia das descargas atmosféricas em Minas Gerais utilizando dados de 1989 a 2002—uma análise exploratória**. 2005. 131 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Geografia) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

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

RIBEIRO, G. H. DE M. **Vulnerabilidade mecânica de árvores relacionada a tempestades convectivas na amazônia central, Manaus (AM)**. 2015. 68 p. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2015.

RIBEIRO, P. **Queda de árvores motivada por ventos fortes em Lisboa**. 2011. 78 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física e Ordenamento do Território) - Instituto de Geografia e Ordenamento do Território da Universidade de Lisboa, Lisboa, 2011.

RIBEIRO, R. **São Paulo perdeu quase 2,5 mil árvores com tempestades de verão, diz Defesa Civil Municipal**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/03/07/sao-paulo-perdeu-quase-25-mil-arvores-por-cao-da-tempestades-de-verao-diz-defesa-civil-municipal.ghtml>>. Acesso em: 12 jun. 2019.

ROLNIK, R.; KLINK, J. Crescimento Econômico e desenvolvimento urbano: por que nossas cidades continuam tão precárias?. **Novos estudos CEBRAP**, n. 89, p. 89-109, 2011.

RONAN, G. **BH teve mais de 10 mil árvores suprimidas em 2018; veja os números**. Disponível em: <<https://nortelivre.com.br/bh-corte-arvores-numeros/>>. Acesso em: 21 jun. 2019.

ROSADO, A. M.; da MATA ATAÍDE, G.; CASTRO, R. V. O.; CORREIA, A. C. G. Avaliação da tolerância à quebra por vento em árvores de eucalipto via teste de resistência. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, p.309-315, 2013.

ROSSETTI, A. I. N.; PELLEGRINO, P. R. M.; TAVARES, A. R. As árvores e suas interfaces no ambiente urbano. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 1, p. 1-24, 2010.

SALVI, L. T.; HARDT, L. P. A.; ROVEDDER, C. E.; FONTANA, C. S. Arborização ao longo de ruas-túneis verdes-em Porto Alegre, RS, Brasil: avaliação quantitativa e qualitativa. **Revista Árvore**, v. 35, n. 2, p. 233-243, 2011.

SAMPAIO, A. C. F; DUARTE, F. G.; SILVA, E. G. C.; DE ANGELIS, B. L. D.; BLUN, C. T. Avaliação de árvores de risco na arborização de vias públicas de Nova Olímpia, Paraná, **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba, v.5, n.2, p.82-104, 2010.

SANTOS, A.; MORAES, R.; ISFER, A. C. A.; ALFACE, B. S. Manual técnico de poda de árvores. 3. ed. rev. São Paulo: **Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente do Estado de São Paulo**, 2015.

SCHALLENBERGER, L. S.; MACHADO, G. DE O. Inventário da arborização na região central do município de Mangueirinha – PR. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, Piracicaba–SP, v. 8, n. 1, p. 54-64, 2013.

SCHUBERT, S.; GSELL, D.; DUAL, J.; MOTAVALLI, M.; NIEMZ, P. Acoustic wood tomography on trees and the challenge of wood heterogeneity. *Holzforschung*, v. 63, n. 1, p. 107-112, 2009.

SEAMANS, G.S. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. *Urban Forestry and Urban Greening*, V.12, p.2-11, 2013.

SILVA, V. DE F. **Neutralização de carbono: adaptabilidade e desenvolvimento de espécies florestais no ambiente urbano**. 2019. 70 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa:, 2019.

SOARES JÚNIOR, F. J. **Composição florística e estrutura de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual na Fazenda Tico-Tico, Viçosa-MG**. 2000. 77 p. Dissertação (Mestrado em Botânica) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa:, 2000.

- SONE, K.; NOGUCHI, K.; TERASHIMA, I. Mechanical and ecophysiological significance of the form of a young *Acer rufinerve* tree: vertical gradient in branch mechanical properties. **Tree physiology**, v. 26, n. 12, p. 1549–1558, 2006.
- SOUZA, M. M., BITTENCOURT, R. A., MARTINI, A. A ocorrência de queda de árvores em Belo Horizonte: análise das condições fitossanitárias dos indivíduos. *In: XXV INTERNATIONAL UNION OF FOREST RESEARCH ORGANIZATIONS - IUFRO. Anais [...]*. Curitiba, 2019. Acesso em: 9 jan. 2020.
- SPATZ, H. C.; BRUECHERT, F. Basic biomechanics of self-supporting plants: wind loads and gravitational loads on a Norway spruce tree. **Forest ecology and management**, v. 135, n. 1-3, p. 33-44, 2000.
- STATHERS, R. J.; ROLLERSON, T. P.; MITCHELL, S. J. Windthrow handbook for British Columbia forests. BC Min. For., Victoria. BC Working Paper 9401, 1994.
- STOKES, A. Strain distribution during anchorage failure of *Pinus pinaster* Ait. at different ages and tree growth response to wind-induced root movement. **Plant and Soil**, v. 217, n. 1-2, p. 17-27, 1999.
- UNITED NATIONS - DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS. Revision of World Urbanization Prospects 2018. Disponível em: <<https://www.un.org/en/development/desa/population/theme/urbanization/index.asp>>. Acesso em: 28 jun. 2019.
- VELASCO, G. D. N.; LIMA, A.; COUTO, H. D. Análise comparativa dos custos de diferentes redes de distribuição de energia elétrica no contexto da arborização urbana. **Revista Árvore**, v. 30, n. 4, p. 679-686, 2006.
- XIAO, Q.; MCPHERSON, E. G., SIMPSON, J. R.; USTIN, S. L. Hydrologic processes at the urban residential scale. Hydrologic processes at the urban residential scale. Hydrological Processes: **An International Journal**, v. 21, n. 16, p. 2174-2188, 2007.
- ZAMPRONI, K.; BIONDI, D.; DE CARVALHO MARIA, T. R. B.; LOUVEIRA, F. A. Diagnóstico quali-quantitativo da arborização viária de Bonito, Mato Grosso do Sul. **Floresta**, v. 48, n. 2, p. 235-244, 2018.