**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais:
avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de
Paulínia, São Paulo**

Matheus Peres Chagas

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

**Piracicaba
2013**

Matheus Peres Chagas
Engenheiro Florestal

**Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação
temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo**
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **MARIO TOMAZELLO FILHO**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção
em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2013

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Chagas, Matheus Peres

Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo / Matheus Peres Chagas. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2013.

159 p: il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013.

1. Dendrocronologia 2. Dendroquímica 3. Monitoramento ambiental 4. Poluição atmosférica 5. LIBS 6. ICP OES 7. Densitometria de Raios X 8. Anéis de crescimento
I. Título

CDD 634.983
C433a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Dedico este trabalho, com enorme gratidão, a minha esposa Aline e ao meu filho Pedro, por todo o amor e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Felizmente, pude contar com muitas pessoas ao longo da redação desta tese. A elas, serei eternamente grato.

Agradeço primeiramente a minha família, pelo apoio sempre presente ao longo da minha caminhada: a minha mãe, Leila Chagas, a meu pai, Edilson Chagas e a minha irmã, Thaíse, pelo amor incondicional e constante incentivo; aos meus avós Antonia Caçoula, Serafim Peres (em memória), Diva Chagas e Alaíde Chagas (em memória), pelos exemplos de vida que me servem como fonte de inspiração.

Ao Mario Tomazello Filho, pela orientação, competência e amizade ao longo dos meus anos de pós-graduação.

Ao Fidel Alejandro Roig, por acreditar e incentivar o desenvolvimento deste trabalho, pelos preciosos ensinamentos e pela calorosa acolhida em Mendoza.

Ao prof. Francisco Krug, pela oportunidade de realização das análises químicas do lenho, pelo constante incentivo e amizade.

Ao grupo de pesquisa em espectrometria atômica do CENA, em especial ao Marcos Gomes, Lidiane Nunes e Iolanda A. Rufini, pelo imensurável auxílio nas análises químicas e tratamento dos milhões (!) de dados obtidos.

A UFSCar, em especial aos professores Edenir Pereira Filho e Joaquim A. Nóbrega e a Lucimar Fialho, pelo pronto auxílio nas análises químicas.

A ESALQ/USP, a todos os professores e funcionários do Departamento de Ciências Florestais (LCF), agradeço pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e pela colaboração em todos os momentos em que precisei.

Aos funcionários do Jardim Botânico de Paulínia, em especial a Jeanette I. Miachir, pelo fundamental auxílio na localização das árvores utilizadas neste estudo.

Ao CNPq, pelo auxílio financeiro.

Ao João Peres Chimelo, agradeço pela amizade, pelo incentivo e pelo exemplo de pessoa que me serve como fonte de inspiração.

Aos amigos do laboratório e da pós-graduação, Alejandro Venegas, Alisson Rangel, Angel Ferreira, Boris Vila, Carlos Sette, Claudio Anholetto, Claudio Lisi, Ivanka Rosada, Jedi

Alvarado, Mariana Pires, Marco Arizapana, Marta Leite, Moisés Lobão, Mauro Soave, Paula Surdi, Priscila Geroto, Renata Bovi, Renata Momoli, Tassio Trevizor, Ugo Belini, Victor Moutinho e Vinícius Castro, agradeço imensamente por todos os auxílios prestados, pela a generosidade demonstrada e, sobretudo, pela amizade.

Ao Antonio Radaeli Neto, agradeço pela dedicação no auxílio do desenvolvimento das análises dendrocronológicas e amizade.

Devo um agradecimento especial a Maria A. Bermudez, pela amizade sincera, pelo constante incentivo, bem como pela ajuda laboratorial.

Aos todos meus amigos que, de perto ou de longe, cada um a sua maneira, contribuíram para a realização deste trabalho. A William S. C. Neto (em memória), Fernando e Ricardo Masini, Leandro e Frederico Mahalem, Luis Felipe e João Paulo Bachur, Licínio Fantinati, João Paulo, Flávia e Eduardo Peres, Jean Bortolato, Gustavo e Renato Leôncio Alves, Raul, Rafael e Roberta Cintra, André Meirelles, Francisco Fujita, Rogério Meneguetti, Pedro Salerno, Gabriel Naif, Milton Egéa, Daniel Machado, Acácio Leite, Daniel Nogueira, Leonardo Queiroz, Gabriel Nascimento, Eduardo Mattar, Rafael C. Cunha, Washington L. Gomes, Mauro Rufatto, Ana Lia Touse, Cristina Vidal, Tadeu Siqueira, Vívian Faria, Mariana Piva, Mariana Pardi e Franciele Santos, meus sinceros agradecimentos.

A família Kamiya, agradeço por todo o carinho, compreensão e pelos bons momentos compartilhados.

Devo ainda um agradecimento especial a Silvia M. Zinsly, pela paciência, o empenho e a eficiência na formatação do texto da tese.

A todas as pessoas que contribuíram para que este trabalho fosse possível, em especial da minha extensa família, não citadas nominalmente aqui.

Todos os equívocos e as insuficiências deste trabalho são de minha integral responsabilidade.

SUMÁRIO

RESUMO.....	9
ABSTRACT.....	11
1 INTRODUÇÃO.....	13
2 OBJETIVOS.....	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 A poluição atmosférica e seus efeitos.....	19
3.2 Bioindicadores e biomonitores ambientais: conceitos gerais.....	22
3.3 Árvores urbanas como atenuadoras da poluição atmosférica.....	24
3.4 Principais vias de absorção e fixação de elementos químicos pelas árvores.....	26
3.5 Efeito da poluição atmosférica no desenvolvimento das árvores.....	29
3.6 Dendrocronologia e o monitoramento ambiental.....	32
3.7 Técnicas de detecção de elementos químicos em anéis de crescimento.....	40
3.8 Aplicação de LIBS em anéis de crescimento do lenho.....	42
3.9 O Parque Industrial de Paulínia- SP como fonte de poluição ambiental.....	44
3.10 Características das espécies do estudo.....	47
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	51
4.1 Caracterização dos sítios de estudo.....	51
4.2 Seleção das espécies para o estudo.....	54
4.3 Coleta das amostras do lenho das árvores: caracterização anatômica macro e microscópica, densitometria de raios X e dendrocronologia.....	55
4.4 Coleta das amostras do lenho das árvores: análises químicas.....	56
4.5 Caracterização anatômica macro e microscópica do lenho das árvores.....	56
4.6 Análise densitométrica dos anéis de crescimento do lenho das árvores.....	57
4.7 Datação dos anéis de crescimento: dendrocronologia.....	59
4.8 Resposta climática das árvores: dendroclimatologia.....	62
4.9 Incremento radial do tronco das árvores.....	63
4.10 Análise química dos anéis de crescimento do lenho das árvores.....	64
4.10.1 Medidas das intensidades das linhas de emissão por LIBS.....	64
4.10.2 Determinação da concentração total de elementos químicos por ICP OES.....	67
4.11 Análises estatísticas.....	68
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
5.1 Características dendrométricas e visuais das árvores selecionadas.....	69

5.2	Análise da fertilidade do solo.....	70
5.3	Caracterização anatômica macro e microscópica do lenho das árvores	73
5.4	Densidade aparente do lenho das árvores	76
5.5	Dendrocronologia das espécies do estudo	81
5.6	Variáveis climáticas e crescimento radial das árvores: dendroclimatologia	87
5.7	Crescimento radial do tronco das árvores	94
5.8	Variação temporal na intensidade das linhas de emissão de macro e micronutrientes nos anéis de crescimento do lenho de árvores: LIBS	98
5.9	Concentração de macro e micronutrientes e de elementos potencialmente tóxicos no lenho das árvores: ICP OES.....	113
6	CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
7	RECOMENDAÇÕES.....	121
	REFERÊNCIAS.....	123
	ANEXOS	145

RESUMO

Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo

O presente estudo tem por objetivo aplicar a análise dos anéis de crescimento de espécies arbóreas no monitoramento ambiental de uma área urbana com histórico de poluição atmosférica. Foram selecionadas árvores das espécies *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Fabaceae-Caesalpinaceae) e *Tabebuia pentaphylla* (Bignoniaceae) e, do seu tronco, foram extraídas amostras do lenho através do método não destrutivo. A área de estudo selecionada foi o Distrito Industrial de Betel, município de Paulínia/SP, Brasil, cujo histórico de poluição ambiental de origem antropogênica é fornecido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) e através de estudos recentes encontrados na literatura especializada. Ainda, foram selecionadas três outras áreas, nos municípios de Paulínia e Piracicaba, distantes em 10, 15 e 60 km, estabelecendo-se um gradiente ambiental de pressão antrópica. Foram aplicadas as análises: (i) caracterização anatômica macro e microscópica e densitometria de raios X, na identificação dos anéis de crescimento do lenho, (ii) dendrocronológica, na datação e avaliação do crescimento radial das árvores, (iii) climática, no estudo da influência dos fatores climáticos no crescimento anual das árvores e (iv) química, na determinação da composição de macro e micronutrientes e de elementos potencialmente tóxicos nos anéis de crescimento do lenho, através da aplicação das técnicas analíticas espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) e espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP OES). Os resultados indicaram que, para as duas espécies, os anéis de crescimento possuem características anatômicas marcantes, correlacionadas com os valores de densidade aparente, que possibilitam a determinação da idade das árvores. A análise das séries temporais de largura de anéis de crescimento demonstrou que as árvores apresentam crescimento sincrônico, condicionado as condições específicas do ambiente onde estão crescendo. A constatação da ausência de um sinal climático comum determinando o crescimento das árvores nos 3 sítios sugere a influência de outros fatores, entre eles, a proximidade em que as árvores se encontram em relação às fontes estacionárias de poluição atmosférica, verificada através dos valores de incremento radial obtidos, sempre menores para as árvores localizadas no Distrito de Betel. A análise da composição química dos anéis de crescimento (ICP OES) revelou diferenças na absorção de elementos químicos entre as árvores das duas espécies e também entre as árvores da mesma espécie crescendo em diferentes locais. Ainda, a avaliação dos valores de intensidade das linhas de emissão dos analitos identificou padrões temporais de fixação de elementos químicos no lenho, com tendência comum para alguns, nos sítios de menor influência antrópica. Também, evidenciou os períodos de maior fixação de elementos com potencial tóxico no lenho das árvores (ex. Al, B, Cu, Fe e Na), relacionados com os anos do início das atividades industriais no Distrito de Betel. Os resultados obtidos neste estudo permitiram concluir que a análise dos anéis de crescimento das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* possui grande potencial no monitoramento ambiental.

Palavras-chave: Dendrocronologia; Dendroquímica; Monitoramento ambiental; Poluição atmosférica; LIBS; ICP OES; Densitometria de Raios-X; Anéis de crescimento

ABSTRACT

Tree rings as environmental monitors: temporal and spatial assessment of air pollution in Paulínia city, São Paulo

This study aims to apply tree rings analysis on environmental monitoring of an urban area with air pollution history. *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Fabaceae-Caesalpinaceae) and *Tabebuia pentaphylla* (Bignoniaceae) trees were selected and wood samples were extracted from their trunk by a non-destructive method. The study area was the Industrial District of Bethel, Paulínia, São Paulo State, Brazil. Its environmental pollution history of anthropogenic origin is provided by the Company of Environmental Sanitation Technology (CETESB) and by recent studies of specialized literature. Three other areas in the municipalities of Paulínia and Piracicaba were also selected, establishing an environmental gradient of anthropogenic pressure within 10, 15 and 60 km distance. The following analyses were applied: (i) macro and microscopic anatomical characterization and X-ray densitometry, for tree rings limits identification (ii) dendrochronological, in dating and evaluating of radial growth, (iii) climatic, analyzing the climatic factors influence on annual growth and (iv) chemical, determining the composition of macro and micronutrients and potentially toxic elements in the tree rings through the application of the analytical techniques Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) and inductively coupled plasma optical emission spectrometry (ICP OES). The results indicated that tree rings formed in both species have remarkable anatomical features correlated with apparent density values, enabling the determination of tree age. The analysis of tree rings' width time series showed that trees exhibit synchronous growth, conditioned by the specificities of the environment where they are growing. The verification of an absent common climate signal determining the tree growth among the 3 studied sites suggests the influence of other factors, including the proximity of trees in relation to stationary sources of air pollution, verified through the obtained values of radial increment, always lower for trees located in the District of Bethel. The tree rings chemical composition analysis (ICP OES) revealed differences in the absorption of chemical elements among trees species and among individuals of the same species growing in different locations. The emission lines intensities assessment (LIBS) analysis identified temporal patterns of chemical elements fixation in wood, with a common trend for those located at sites with lower anthropogenic influence. It also showed periods of increased fixation of potentially toxic elements in tree trunk (e.g Al, B, Cu, Fe, and Na), related to the early years of industrial activities in the District of Bethel. The results obtained in this study allowed us to conclude that the tree rings analysis of *C. pluviosa* and *T. pentaphylla* has great potential for environmental monitoring.

Keywords: Dendrochronology; Dendrochemistry; Environmental Monitoring; Atmospheric pollution; LIBS; ICP OES; X-ray densitometry; Tree rings

1 INTRODUÇÃO

A partir da revolução industrial a poluição atmosférica se apresenta, no cenário mundial, como um dos maiores problemas ambientais. O crescimento desordenado da população e da industrialização determinou um aumento sem precedentes na contaminação do ar, especialmente nos grandes centros urbanos, ocasionando efeitos prejudiciais nos ecossistemas e na saúde humana (CARNEIRO, 2004). As principais fontes de emissão de poluentes são as indústrias, como fontes estacionárias, e o tráfego veicular como fonte móvel (CETESB, 2009).

Inúmeros estudos demonstram que a poluição atmosférica prejudica a saúde da população, causando doenças respiratórias e aumentando o risco de doenças cardiovasculares e até mesmo alguns tipos de câncer (POPE et al., 2002). Os poluentes atmosféricos absorvidos pelas plantas podem ocasionar alterações fisiológicas, bioquímicas e anatômicas e, através do processo de deposição atmosférica, podem atingir o solo e os lençóis freáticos (MAIOLI, 2006).

É consensual a necessidade do monitoramento dos agentes poluentes que ameaçam a saúde e a qualidade de vida dos seres humanos e dos demais organismos vivos, assim como a integridade do meio abiótico, sendo uma tarefa extremamente complexa a definição de parâmetros e valores que quantifiquem as condições de sanidade do ambiente sadio. Neste contexto, foram introduzidos os indicadores ambientais, aplicados na identificação dos processos de contaminação e do estado qualitativo do ambiente, definindo parâmetros que fornecem informações relevantes do estado do ambiente e das atividades humanas que são afetadas ou afetam o ambiente (USEPA, 1995).

O biomonitoramento, considerado como um indicador ambiental constitui-se em um método experimental indireto de detecção de poluentes em determinada área, utilizando-se de organismos vivos, que respondem ao estresse provocado pela poluição por modificações nos seus ciclos vitais ou pela acumulação de poluentes (CARRERAS e PIGNATA, 2002). Além disso, é tido como uma alternativa à instrumentação convencional de avaliação da poluição do ambiente, pelas vantagens de baixo custo de implantação e de manutenção, permitindo o monitoramento de grandes áreas e de maneira retrospectiva (HAGEMEYER, 2000; De TEMMERMAN et al., 2004).

O biomonitoramento da poluição atmosférica foi introduzido há mais de 30 anos utilizando de ampla diversidade de organismos, como os líquens, musgos, samambaias, etc.,

além de folhas, casca e anéis de crescimento do lenho das árvores (KLUMPP, et al., 2003; CARRERAS et al., 2006; VIVES et al., 2006; BERLIZOV et al., 2008; ORECCHIO et al., 2008; SCHELLE et al., 2008). O efeito dos poluentes sobre as plantas ocorre em diferentes níveis, afetando determinadas partes do vegetal até a totalidade dos ecossistemas. Os sintomas em nível macroscópico podem ser caracterizados pelas necroses e descoloração das folhas e de outras partes da planta, assim como uma diminuição do seu crescimento.

No caso específico das árvores, os estudos de biomonitoramento têm sido aplicados na avaliação retrospectiva das alterações dos ambientes comprovadamente poluídos pela análise dos anéis de crescimento. A dendroquímica ou dendroanálise - o método de análise dos poluentes nos anéis de crescimento – fundamenta-se na premissa de que as árvores registram e incorporam no seu lenho, ano após ano, as impressões do meio abiótico, possibilitando o estudo das alterações ambientais (como a poluição) ocorridas ao longo da vida das árvores (TOMAZELLO et al., 2001).

Inúmeras publicações relatam a aplicação dos anéis de crescimento de espécies arbóreas de clima temperado no monitoramento da poluição atmosférica por elementos químicos como Cu, Cd, Zn, Pb, Hg, etc. (ROLFE, 1974; SYMEONIDES, 1979; BAES e MCLAUGHLIN, 1984; VROBLESKY et al., 1990; EKLUND, 1995; ZHANG et al., 1995; JONSSON et al., 1997; FISHER et al., 2002; KAWAMURA et al., 2006; SAVARD et al., 2006; SIWIK, 2007).

No Brasil, da mesma forma, as pesquisas desenvolvidas em condições urbanas subtropicais aplicam os anéis de crescimento de árvores de *Caesalpinia peltophoroides*, *Araucaria columnaris*, *Copaifera langsdorfii* e *Tipuana tipu* na avaliação da poluição ambiental por Pb e outros metais (MEDEIROS, 2005; VIVES et al., 2006; FARIA, 2007; MEDEIROS et al., 2008; GERALDO, 2011).

Historicamente, o esforço nas inovações das técnicas analíticas de determinação elementar em materiais vegetais, converge para a determinação de um número cada vez maior de elementos químicos, reduzindo-se os limites de detecção, em amostras sólidas que necessitam de mínima preparação. Neste contexto, a metodologia LIBS, desde o final da década de 1980, tornou-se disponível no cenário analítico da espectroscopia atômica e, desde então, sua aplicação tem sido continuamente aperfeiçoada. No entanto, os trabalhos de biomonitoramento que utilizam anéis de crescimento das árvores associado à aplicação de LIBS são extremamente escassos e recentes, com destaque aos realizados por Martin et al. (2007), Bandak (2011) e Wagner et al (2012).

Embora a dendroquímica constitua-se em método que proporciona informações sobre as alterações temporais na composição química do solo e da atmosfera (WATMOUGH, 1997), algumas perguntas ainda permanecem, como: (i) quais são as vias de ingresso dos poluentes no sistema árvore-solo-água-atmosfera?; (ii) a absorção de elementos não essenciais é proporcional aos níveis existentes no ambiente onde as árvores estão se desenvolvendo?; (iii) uma vez no interior da planta, os elementos minerais fixam-se nos tecidos do xilema ou são móveis? e, (iv) por quanto tempo os sinais biogeoquímicos são preservados no lenho das árvores? (BRABANDER et al., 1999). As respostas parciais à essas questões dizem respeito aos processos que regem a captação e o armazenamento dos elementos químicos nos tecidos das espécies vegetais potenciais para o biomonitoramento, justificando a necessidade de novos estudos.

Neste contexto, o presente trabalho aplica os anéis de crescimento formados no lenho das árvores de duas espécies como biomonitores ambientais na avaliação de alterações passadas e das condições atuais de qualidade ambiental de uma área com histórico de poluição atmosférica. Ainda, procura responder questões sobre (i) o comportamento das árvores das espécies bioindicadoras; (ii) a aplicação dos bioindicadores na avaliação das variáveis ambientais e dos poluentes; (iii) a relação dos teores dos elementos minerais no lenho das árvores com os do ambiente e (iv) indícios da mobilidade radial dos elementos químicos no tronco das árvores pela avaliação de cada uma das árvores.

2 OBJETIVOS

Geral

Analisar o potencial da aplicação dos anéis de crescimento do tronco de árvores de *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* e de *Tabebuia pentaphylla*, como biomonitores, na avaliação temporal e espacial da qualidade ambiental em um gradiente de poluição atmosférica no município de Paulínia/SP.

Específicos

1. Caracterizar a estrutura anatômica macro e microscópica dos anéis de crescimento do lenho das árvores;
2. Determinar a idade e a taxa de crescimento radial do tronco das árvores pela análise dos anéis de crescimento.
3. Caracterizar os limites dos anéis de crescimento pela densitometria de raios X, através do perfil radial da densidade intra e inter-anéis de crescimento;
4. Avaliar o efeito da sazonalidade climática anual e da proximidade das fontes de poluição no crescimento radial do tronco das árvores;
5. Determinar a variação na fixação dos macro e micronutrientes e elementos químicos potencialmente tóxicos no lenho de árvores crescendo em diferentes condições ambientais;
6. Avaliar o potencial da aplicação dos anéis de crescimento como indicadores temporais de alterações em ambientes contaminados;
7. Avaliar a aplicação da técnica analítica LIBS em estudo dendroquímicos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 A poluição atmosférica e seus efeitos

O nível de poluição atmosférica é determinado pela quantificação das substâncias poluentes presentes no ar. Conforme a Resolução CONAMA Nº 3 de 28/06/1990, considera-se poluente atmosférico “qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e à flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade” (CETESB, 2009).

Classicamente, os poluentes atmosféricos são divididos em duas categorias: poluentes primários, quando emitidos diretamente pelas fontes; e poluentes secundários, formados por reações químicas entre poluentes primários e outros constituintes da atmosfera (BRAGA et al., 2002; BRASIL, 1990; CAMPOS, 2002).

Já as fontes emissoras de contaminantes atmosféricos são classificadas em estacionárias ou móveis. As principais fontes estacionárias estão ligadas a processos de combustão decorrentes da produção industrial, de usinas termoeletricas ou da queima de resíduos sólidos e em serviços urbanos de tratamento de resíduos; as fontes móveis, são representadas, principalmente, pelos veículos automotores (BRASIL, 1990; CETESB, 2009).

A determinação sistemática da qualidade do ar deve ser, por questões de ordem prática, limitada a um restrito número de poluentes, definidos em função de sua importância e dos recursos materiais e humanos disponíveis. De forma geral, o grupo de poluentes consagrados universalmente como indicadores mais abrangentes da qualidade do ar é composto pelo: monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), material particulado (MP₁₀ e MP_{2,5}), ozônio (O₃) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). A razão da escolha desses parâmetros como indicadores de qualidade do ar está ligada a sua maior frequência de ocorrência e aos efeitos adversos que causam ao meio ambiente (CETESB, 2009).

O relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo (Figura 1), elaborado pela CETESB em 2009, relaciona os principais poluentes indicadores da qualidade do ar, as suas características, origem principal e efeito no meio ambiente.

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Inaláveis (MP ₁₀) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 10 micra.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem, etc. Faixa de tamanho < 100 micra.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua ressuspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol, marinho e solo.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. Pode ser transformado a SO ₃ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinaria de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa e papel, fertilizantes.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação: folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (o qual contribui para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas que utilizam óleo ou gás, incinerações.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais.

Figura 1 – Fontes e características dos principais poluentes na atmosfera do Estado de São Paulo. Fonte: CETESB (2009)

Jardim (1983) e Macedo (2002) destacam que as indústrias são as fontes poluidoras de origem antropogênica que, mais comumente, contaminam o ambiente pela descarga de efluentes não tratados nos recursos hídricos, apesar da liberação de partículas na atmosfera ser, em muitos casos, o principal veículo poluidor.

Uma classe de poluentes atmosféricos que recebe atenção especial inclui os denominados “elementos-traço”, ocorrendo em concentrações de parte por milhão (ppm) ou bilhão (ppb), aplicadas na determinação e quantificação de metais. Os metais são constituintes normais dos compartimentos ambientais: solo, água, sedimento, ar e organismos vivos (PROCHNOW, 1995), com o termo “metal pesado” associado aos elementos químicos dos grupos de transição da tabela periódica, com forma iônica de densidade atômica elevada (> 6,0 g.cm⁻³) ou massa atômica maior que 20. Além dos metais, semi-metais e não-metais são constituintes deste grupo (MATOS et al., 1996), sendo alguns elementos denominados de

micronutrientes ou elementos-traço essenciais, requeridos pela maioria dos organismos vivos em pequenas concentrações, podendo causar toxicidade quando em excesso (Cu, Mn, Fe, Zn, essenciais às plantas e animais; Co, Cr, Se, I essenciais aos animais; B, Mo, Ni, essenciais às plantas). Os elementos que não apresentam funções biogeoquímicas essenciais são chamados de “elementos não-essenciais” ou “elementos tóxicos” (As, Cd, Hg, Pb, Pu, Sb, Tl, U), causando toxicidade em concentrações que excedem a tolerância dos organismos, não induzindo, como os micronutrientes, a deficiência em baixas concentrações (ALLOWAY e AYERS, 1996).

As atividades industriais e a mineração têm contribuído para o aumento do nível de poluentes atmosféricos de muitos ecossistemas naturais (OLIVEIRA e HORN, 2006). A emissão veicular apresenta um elevado grau de nocividade ao ser humano e ao ambiente e, devido ao rápido aumento da motorização individual, alguns poluentes emitidos em excesso comprometem a qualidade do ar e colocam em risco a saúde da população (SILVA, 2007), sendo o Cu, Pb e Zn os elementos tóxicos de maior importância e relacionados com tráfego veicular (LEGRET e PAGOTTO, 1999). Historicamente, o Pb foi o mais importante metal pesado associado ao tráfego rodoviário mas com sua remoção como aditivo da gasolina, houve uma significativa redução de sua emissão (RODE et al., 2010). São, da mesma forma, importante os metais, como o Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb e Zn, oriundos do desgaste de freios, o Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Mo, Ni e Pb, dos pneus e o Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Pb e V dos gases de escape da combustão de combustíveis fósseis (HJORTENKRANS et al., 2006). Outros estudos apontam o Ba, Fe, Mn, Ni e S, além dos elementos químicos citados, como diretamente relacionados ao tráfego veicular (LASCHOBBER et al., 2004; SILVA, 2007; MARTINS, 2009 e MAHER et al., 2008). Nesse aspecto, o Ba, Cu, Mo, Pb, S, Sb e Zn foram detectados em musgos utilizados como indicadores de poluição pelo tráfego rodoviário em um túnel de Viena (ZECHMEISTER et al., 2006).

Os poluentes atmosféricos têm afetado a saúde da população, mesmo em níveis abaixo da legislação vigente, atingindo mais intensamente a faixa etária das crianças (BRAGA et al., 1999; LIN e PEHKONEN, 1999) e os idosos (SCHWARTZ e DOCKERY, 1992; ATKINSON et al., 2001; MARTINS et al., 2002) bastante suscetíveis aos efeitos deletérios da poluição. Alguns estudos demonstraram uma associação entre a mortalidade e a morbidade aos problemas respiratórios causados pela poluição (BRAGA et al., 1999; LIN e PEHKONEN, 1999).

A relação da mortalidade infantil e a poluição atmosférica na cidade de São Paulo (1994-1997) foi avaliada por Conceição et al. (2001), com as variáveis (tempo, temperatura, umidade e concentração de poluentes) sendo associada aos índices de mortalidade infantil por doenças respiratórias de crianças (abaixo 5 anos) e também observada associação significativa da mortalidade e as concentrações de CO, SO₂ e MP₁₀. Considerando a média da concentração dos poluentes no período de estudo, a proporção de mortes por doenças respiratórias estimadas e atribuídas a CO, SO₂ e MP₁₀ foi de, cerca de, 15, 13 e 7%, respectivamente.

Nos 57 municípios da região metropolitana de Barcelona, Espanha, com 4 milhões de habitantes, Pérez et al. (2009) estimaram que cerca de 3.500 mortes anuais são causadas pelo alto índices de poluição atmosférica. Também, que a redução da poluição nos níveis da *World Health Organization* (20g/m³ de MP₁₀) levaria a uma melhoria significativa na saúde da população e economia local, com 12% de redução da mortalidade, aumento de 14 meses na expectativa de vida, 1800 menos internações por problemas cardiorrespiratórios, 5100 casos a menos de bronquite em crianças, 54000 menos ataques de asma em adultos e crianças, além de benefício econômico de 6400 milhões de euros/ano.

Segundo Valavanidis et al. (2000) as partículas inaláveis suspensas na atmosfera, provenientes da exaustão dos veículos, podem penetrar profundamente no sistema respiratório e gerar radicais livres de oxigênio, causando injúrias agudas e crônicas nos pulmões.

Cabe ressaltar que o tipo e a concentração de poluentes no tempo/espaço é muito importante para estimar a dose de poluição/pessoa, sendo que, na cidade de São Paulo, por exemplo, a CETESB monitora a qualidade do ar atmosférico através de 12 estações de medição, com equipamentos automáticos de alto custo de instalação e manutenção. É inviável instalar estações convencionais de medição da poluição em toda a cidade e, no entanto, é importante melhorar a resolução espacial da concentração dos poluentes. Com esse objetivo, o biomonitoramento é importante na avaliação da poluição atmosférica das cidades.

3.2 Bioindicadores e biomonitores ambientais: conceitos gerais

Entende-se por bioindicação a utilização de organismos vivos para a obtenção de informações da qualidade de um determinado ambiente, deduzidas na forma qualitativa,

através da detecção de alterações de diferentes naturezas nas espécies estudadas (MARKERT, 1993), neste caso, chamadas bioindicadores ambientais.

Nas últimas décadas, devido a grande influência antrópica sobre os ecossistemas urbanos, o uso de bioindicadores vem se tornando cada vez mais necessário (OLIVEIRA et al., 1997; FRANÇA, 2006), tendo sido amplamente aplicados no monitoramento e no dos processo da poluição.

Na literatura específica, alguns autores como Nimis et al., (2000), Klumpp et al., (2001), e Maioli, (2006), apresentam diferentes classificações para os bioindicadores, sendo as principais:

- (i) bioindicadores não específicos e específicos: quando uma mesma reação pode ser provocada por diferentes fatores (ex. antrópicos), enquanto a bioindicação específica ocorre quando um fator ambiental provoca a reação;
- (ii) bioindicadores sensíveis e acumulativos: sofrem alterações morfológicas, fisiológicas e genéticas quando submetidos, por exemplo, à atmosfera poluída. Já o bioindicador acumulativo caracteriza-se pela acumulação de elementos químicos da poluição nos tecidos, sem mostrar danos passíveis de serem reconhecidos em curto espaço de tempo;
- (iii) bioindicadores ativos e passivos: são introduzidos no meio em estudo e dispostos a situações controladas, tais como solo e disponibilidade de água e luz. Já o bioindicador passivo se encontra nas condições naturais do ambiente e originalmente pertence ao meio.

Como uma vertente dos indicadores ambientais, o biomonitoramento pode ser definido como um método experimental indireto para verificar os poluentes em certa área por organismos vivos, que respondem ao estresse por modificação no ciclo vital ou pelo acúmulo de poluentes (ROSSBACH et al. 1999; CARRERAS e PIGNATA, 2001). Dessa forma, a diferença dos bioindicadores e biomonitores dá-se pelo tipo de resposta que fornecem. Os bioindicadores provêm informações sobre a qualidade do ambiente ou de suas modificações, a "resposta" dos biomonitores pode ser quantificada, por exemplo, pela determinação da concentração de elementos químicos medida diretamente no tecido de um organismo como reflexo das mudanças nas condições ambientais (MOTA-FILHO, 2012). No que concerne às vantagens do biomonitoramento em relação aos métodos tradicionais de verificação dos níveis de poluição, é possível citar: baixo custo de instalação e acompanhamento; eficiência no monitoramento de áreas amplas e períodos longos de tempo; viabilidade de se avaliar elementos químicos presentes em baixas concentrações no ambiente em estudo (CARRERAS

e PIGANATA, 2001); oferta de um panorama da resposta integrada dos organismos as modificações ambientais e de avaliação da efetividade de ações mitigadoras tomadas para contornar os problemas criados pelo homem (CONTI e CECCHETHI, 2001).

Alguns autores referem-se à dificuldade em se diferenciar nos organismos os efeitos de poluentes e processos de reação às demais condições ambientais, como solo, clima e alterações antrópicas. Assim, o biomonitoramento torna-se mais adequado quando fornece dados que podem ser comparados com informações obtidas pelos métodos convencionais de monitoramento ambiental (NIMIS et al., 2000; KLUMPP et al., 2001).

Entre os organismos bioindicadores mais consagrados aplicados em processos de poluição destacam-se os líquens, os musgos e as plantas superiores (CARNEIRO, 2004). A autora, em seu trabalho de doutorado, resumizou os bioindicadores utilizados em 126 trabalhos científicos, realizados em 34 diferentes países, de um total de mais de 4000 pré-selecionados, levantando o conhecimento das experiências acadêmicas nesta área de estudo e ampliando o conhecimento sobre o tema. Os resultados revelaram a utilização de 112 espécies vegetais, sendo 64 espécies pertencentes à divisão *Angiospermae*; 11 espécies da divisão *Coniferophyta*; 22 espécies de líquens e 15 espécies de musgos, relacionadas ao monitoramento de um ou mais dos seguintes poluentes atmosféricos: metais pesados, ozônio, material particulado, dióxido de enxofre, óxidos de nitrogênio, monóxido de carbono, fluoretos, compostos orgânicos voláteis e hidrocarbonetos.

3.3 Árvores urbanas como atenuadoras da poluição atmosférica

A interação dos poluentes com as plantas pode ser benéfica ao ambiente e ao homem, uma vez que a vegetação pode acumular, transformar e absorver poluentes, mesmo sofrendo danos causados pela poluição, pois atuam como bioindicadoras da poluição (MOREIRA, 2010).

As plantas que crescem em ambiente urbano são capazes de melhorar a qualidade do ar interceptando o material particulado e absorvendo poluentes gasosos pelos estômatos das folhas (HARRIS et al., 1999), além de neutralizar, através de processos químicos, diversos poluentes (ALMEIDA, 2006).

Maco et. al (2003) indicaram os mecanismos de melhoria da qualidade do ar atmosférico pela presença de árvores e outros vegetais crescendo em ambientes urbanos, sendo (i) absorção de poluentes gasosos (ex: O₃, NO₂ e SO₂) através da superfície das folhas;

(ii) interceptação do material particulado (pó, cinza, pólen e fumaça); (iii) liberação de O_2 e sequestro de CO_2 através da fotossíntese; (iv) transpiração da água e sombreamento de superfícies, o que conduz à diminuição da temperatura do ar local e, conseqüentemente, reduz as concentrações de O_3 , pela diminuição da emissão de hidrocarbonetos.

Alguns autores, como Santos e Teixeira (2001), afirmam que ruas bem arborizadas podem reter até 70% da poeira em suspensão e, mesmo no inverno, quando algumas espécies se apresentam desfolhadas, são capazes de ter até 60% de sua capacidade total. Eles explicam que a remoção dos gases tóxicos existentes na atmosfera pelas plantas ocorre quando esses gases se encontram retidos no material particulado, sendo filtrados conjuntamente. Se esses gases forem tóxicos, mas se apresentarem em doses subletais, eles permanecerão inócuos; já em doses letais, as plantas poderão ter seu desenvolvimento comprometido.

Bernatzky, 1978 apud Harris et al. (1999) observou que em Frankfurt as ruas principais possuíam 3.000 particulados por litro de ar e ruas sem árvores possuíam 10.000-12.000 partículas por litro. O autor concluiu em seu trabalho que as plantas diminuem a concentração de elementos potencialmente tóxicos no ar, a exemplo do níquel (Ni), chumbo (Pb), cádmio (Cd), cromo (Cr), e que a concentração de Pb aumenta rapidamente conforme aumenta a distância das avenidas que possuem árvores e arbustos.

A remoção da poluição do ar por árvores foi estimada na região de Chicago (cobertura arbórea = 19%), onde se calculou que as árvores urbanas retiraram 5.575 t de poluentes do ar durante 1991, correspondendo a uma economia de US\$ 9,2 milhões. Nesses cálculos, os custos da prevenção da emissão de poluentes usando estratégias conhecidas de controle das emissões foram multiplicados pelas toneladas métricas de poluentes removidos pelas árvores. As árvores removiam com mais eficiência o ozônio (2.000 t/ano) e particulados com até 10 μm (1.840 t/ano). Árvores grandes e maduras removiam de 60 a 70 vezes mais poluentes do ar do que árvores pequenas, devido à maior área foliar. Estimou-se que as árvores com diâmetro maior do que 76 cm removeram individualmente cerca de 1,4 kg de poluentes no ano, enquanto árvores com diâmetro menor do que 8 cm removeram cerca de 0,02 kg de poluentes no ano (NOWAK, 1998).

Freer-Smith e Broadmeadow (1996) desenvolveram um modelo para estimar a quantidade de poluentes retirados pelas árvores das florestas. O citado modelo, aplicado ao *Greenwood Community Forest* (Reino Unido), permitiu estimar que 10% da cobertura do bosque diminui a concentração de poluentes do ar em 4-5%. Ainda, que um aumento da cobertura de árvores de 22%, aproximadamente, pode conduzir a uma redução de 6-11% dos

poluentes do ar. Prevê-se que a atenuação seja maior (23-31%) quando a concentração de poluentes se apresenta mais elevada.

Próximo a cidade de Chicago, Estados Unidos, Mcpherson et al. (1994) concluíram em seu estudo que a floresta urbana foi responsável pela remoção diária de 1,2 ton. CO, 3,7 ton. SO₂, 4,2 ton. NO₂, 10,8 ton. O₃ e 8,9 ton. MP₁₀.

Recentemente, no Brasil, Moreira (2010) determinou a concentração de poluentes, vinculados a emissão de fontes veiculares, presente nas folhas de 3 espécies arbóreas, na cidade de São Paulo, verificando a existência da interação direta da vegetação com o ambiente. Entre as conclusões de seu trabalho destaca-se a eficiência da utilização da vegetação na amenização de poluentes presentes no ambiente urbano, a detecção de distintas formas de absorção de elementos químicos pelas espécies e a demonstração da diminuição da concentração de poluentes conforme diminui a distância da fonte poluidora.

Aplicando cascas de árvores como biomonitores da poluição atmosférica em 5 parques urbanos da cidade de São Paulo, Martins (2009) concluiu, a partir do modelo de acúmulo de poluentes obtido, que foi possível discriminar o tipo de tráfego predominante entre os locais estudados (pesado e leve) e também que os parques podem atuar como filtros do ar, pois o centro de cada parque apresenta menores concentrações de elementos-traço, enquanto que áreas mais externas apresentaram concentrações mais elevadas.

3.4 Principais vias de absorção e fixação de elementos químicos pelas árvores

Salvo as exclusoras, a maioria das espécies vegetais crescendo em ambientes poluídos não consegue evitar a absorção de elementos químicos nocivos, mas somente limitar sua translocação (BAKER, 1981).

Forget e Zayed (1995) e, mais recentemente, Watt et al. (2007) estabelecem que as rotas de absorção de elementos químicos pelas árvores são as raízes, folhas e a casca (Figura 2), com subsequente transporte pelo floema até o xilema.

O sistema radicular é considerado o principal órgão de contato das plantas com os elementos químicos presentes no solo e quando interceptados pelas raízes entram no apoplasto e podem ser transportados para o interior da célula via apoplasto ou ligados permanentemente a substâncias de carga negativa da parede celular (GREGER, 1999). A entrada para o apoplasto envolve o transporte passivo, explicado por fluxo de massa,

em que a água se move de um local com maior potencial para outro de menor potencial carregando consigo os elementos químicos, e difusão, dependente do gradiente de concentração na região radicular (TAIZ e ZEIGER, 2004).

No entanto, a absorção desses elementos depende da capacidade e das características de crescimento do sistema radicular (STRAIT e STUMM, 1993) e do solo (KABATA-PENDIAS, 2004). De maneira geral, em solos bem aerados e ácidos, os elementos (ex. Cu e Zn) encontra-se mais disponíveis as plantas, enquanto em solos pouco aerados e com pH neutro a alcalino, sensivelmente menos disponíveis.

Ainda, segundo Weiss et al. (2003) as propriedades físico- químicas do solo como a fração de massa total do elemento químico, fração móvel e trocável, potencial hidrogeniônico (pH), matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, textura, umidade e a interferência de íons competidores, são determinantes na absorção de elementos químicos por plantas.

A segunda rota de absorção é via foliar, tendo sido detectadas altas concentrações de íons na superfície das folhas, principalmente em áreas poluídas. Praticamente todos os elementos traço podem ser encontrados na água da chuva sendo, entretanto, difícil estabelecer a relação entre a sua deposição e os níveis existentes nas folhas ou em outras partes dos vegetais, como o lenho, sendo esta rota de absorção em dendroquímica ainda incerta (FORGET e ZAYED, 1995).

Figura 2 - Principais vias de absorção dos elementos químicos nas plantas. Adaptado de Siwik (2007)

Baumbach (1996) afirma que existem duas formas de entrada dos poluentes presentes na atmosfera nas folhas ou acículas: estomática, através da abertura e fechamento dos estômatos regulados pela necessidade de gás carbônico (CO_2) para a fotossíntese e evapotranspiração, e através da epiderme, pela cutícula, sendo a primeira via a mais frequente. Os poluentes são relocados nos espaços intracelulares e alguns são capazes de destruir estruturas celulares e/ou interferir no metabolismo das plantas.

O tamanho das partículas influencia qual órgão será mais eficiente em sua captação. Os pecíolos são mais eficientes para partículas de 10 μm ou mais. A chuva é responsável por lavar as partículas com 20-30 μm e até maiores. As partículas de 1-5 μm são retidas nos pêlos e os elementos potencialmente tóxicos estão mais associados com o particulado fino (SMITH, 1990).

Alguns elementos químicos, provenientes da atmosfera, podem também ser absorvidos pela casca das árvores através de deposição seca ou úmida, sendo aplicada no monitoramento ambiental de poluentes como sulfatos, nitratos e compostos orgânicos. Estes elementos acumulam-se nas camadas mais externas da casca das árvores e seu teor decresce exponencialmente para o interior do lenho, indicando uma limitada difusão (BELLIS et al., 2002). Desta forma, como na absorção foliar, é difícil avaliar a importância desta rota de entrada de elementos minerais no interior da planta e a sua aplicação no monitoramento ambiental através dos anéis de crescimento (FORGET e ZAYED, 1995).

Somado a isso, sabe-se que espécies ou variedades de uma mesma espécie vegetal, expostas a uma concentração similar de determinado elemento, podem diferir na absorção e/ou distribuição interna desses na planta (SOARES et al., 2001), fato atribuído a habilidade genotípica de acumular e movimentar esses elementos.

A idade das plantas é, também, importante, sendo que árvores jovens tendem a absorver, acumular e mobilizar grande quantidade de elementos químicos, enquanto as árvores maduras dependem muito mais da ciclagem bioquímica para a manutenção (PRICHETT e FISHER, 1987), refletindo diretamente no teor encontrado no lenho. Dessa forma, a complexidade desses mecanismos de absorção e os fatores envolvidos tornam difícil definir precisamente qual a proporção de cada elemento encontrado nos anéis de crescimento é proveniente de cada das três vias de absorção.

Os elementos químicos absorvidos pelas plantas a partir dos diferentes compartimentos (raiz, folha, casca) são translocados até o xilema onde ficam incorporados, entretanto, muitas

vezes estes elementos podem ser deslocados ultrapassando os limites do anel de crescimento (BELLIS et al., 2002), constituindo-se em variável a ser considerada nas análises (FORGET e ZAYED, 1995). Neste sentido, Cutter e Guyette (1993) referem-se à mobilidade dos elementos no interior do lenho e os classificaram com base na solubilidade e na razão carga iônica/raio iônico em: (i) altamente móveis (As, K, Na, Mg, N, S, Cl, B), (ii) moderadamente móveis (Ca, Sr, Mn, Zn, Rb, Cu) e (iii) de baixa mobilidade (Fe, Mo, Ni, Sn, Ba, Al, Pb, Cd, Hg).

3.5 Efeito da poluição atmosférica no desenvolvimento das árvores

Geralmente, o efeito da poluição nas plantas inicia-se em nível bioquímico e evolui para as alterações da intra-estrutura celular, desorganizando a membrana das células; segue para o nível celular, com a desestruturação do núcleo das células, sendo expresso pelos sintomas de clorose ou necrose do tecido foliar e, finalmente, causando alterações no crescimento e desenvolvimento da planta (KHAN e MALHOTRA, 1984).

Dentre os diversos poluentes sabe-se que alguns elementos químicos em níveis tóxicos podem diminuir a biossíntese de clorofila, causar a peroxidação dos lipídios nas membranas fotossintéticas e, quando presentes na superfície foliar, causar efeitos negativos na taxa fotossintética, fechando os estômatos e diminuindo a penetração da luz (BAYCU et al., 2006).

Barceló e Poschenrieder (1999) apresentaram os efeitos de elementos-traço na estrutura e morfologia da raiz de plantas, caracterizado pela (i) redução do alongamento e danos nas pontas da raiz; (ii) colapso e redução das raízes capilares e da biomassa radicular; (iii) aumento ou redução na formação de raízes laterais; (iv) aumento da suberização e lignificação; (v) redução do diâmetro dos vasos e (vi) alterações estruturais da hipoderme e endoderme.

Visando avaliar a concentração de elementos tóxicos na largura dos anéis de crescimentos, foram desenvolvidos vários trabalhos, a partir da década de 70, apresentados por Watmough (1997) e adaptados na Tabela 1. É apresentada a concentração máxima dos elementos químicos no lenho de diferentes espécies, com variações e em apenas alguns trabalhos é reportada a redução do crescimento radial do tronco das árvores, permitindo afirmar que não necessariamente ocorrem em árvores com as maiores concentrações dos elementos.

Em árvores de *Pinus densiflora*, Fukuoka e Kishi (1995) verificaram uma redução da taxa de crescimento do tronco, atribuída como efeito da deposição dos contaminantes na superfície das acículas, mais do que pela concentração dos elementos químicos no seu lenho. Kozlowski, 1971 apud Fritts (1976) observou que as condições ambientais no ano anterior têm igual ou maior efeito na variação da largura dos anéis de crescimento do que as condições do ano corrente em árvores de *Fagus grandifolia*.

Os estudos da anatomia do lenho de árvores de *Tibouchina pulchra* expostas a poluição atmosférica demonstram a pressão de seleção para a espécie superar as restrições nutricionais e assegurar o transporte hídrico, corroborando os diagnósticos prévios de diminuição da taxa de crescimento das árvores em áreas poluídas (MAZZONI-VIVEIROS et al., 1995).

A emissão de poluentes na atmosfera pelos complexos industriais das regiões de Yeochon e de Onsan- Coréia do Sul afetou negativamente a atividade cambial das árvores de *Pinus thunbergii*, ocorrendo uma diminuição da largura dos anéis de crescimento, retomando medidas normais após o final da atividade industrial (JONG-KAB KIM, 1995).

Em regiões poluídas no Estado de São Paulo, Brasil, Segala Alves (1995) observou alterações no lenho de árvores de *Cecropia glazioui*, face à interferência dos poluentes nas funções celulares, em solos ácidos e pobres, vindo a afetar as suas folhas e lenho.

Medeiros et. al. (2008), estudando o efeito do Pb no crescimento e na anatomia do lenho de *Araucaria columnaris*, em Piracicaba/SP, concluíram que a presença deste elemento nos anéis de crescimento não afetou a estrutura anatômica e a taxa de crescimento do seu tronco.

Da mesma forma, Chagas (2009), comparando a taxa de crescimento do tronco de 4 espécies arbóreas em um sítio comprovadamente contaminado, não observou relação significativa entre os altos valores de Hg no lenho e o incremento radial do tronco das árvores.

Na China, Kuang et al. (2008) compararam o efeito da poluição do ar no crescimento do tronco das árvores de *Pinus massoniana*, observando menor crescimento radial das árvores no sítio poluído em relação ao controle, a partir da década de 80, marcada pela implementação de reformas políticas-industriais no país.

Tabela 1 – Exemplos de concentrações máximas de elementos-traço determinadas em anéis de crescimento de espécies arbóreas. Adaptado de Watmough (1997)

Espécie	Concentração do elemento (mg/kg)						Redução no incremento radial	Referência
	Cu	Cd	Zn	Pb	Ni	Al		
<i>Picea rubens</i>	0,08	-	1,00	-	0,18	1,60	não	Arp e Manasc, 1998
<i>Quercus robur</i>	-	-	-	0,34	-	-	não	Ault et al., 1970
<i>Pinus echinata</i>	0,30	1,80	160,0	-	-	24,0	não	Baes e McLaughlin, 1987
<i>Picea rubens</i>	1,00	-	8,60	-	2,50	22,0	não	Baes e McLaughlin, 1987
<i>Populus nigra</i>	1,50	-	26,0	2,50	-	-	não	Barnes et al., 1976
<i>Picea abies</i>	0,60	-	15,0	5,00	-	-	não	Barnes et al., 1976
<i>Juniperus communis</i>	-	0,05	4,00	3,40	-	-	não	Berg e Steinnes, 1993
<i>Carya sp.</i>	1,82	0,06	107	1,60	8,20	0,08	não	Berish e Ragsdale, 1985
<i>Pinus sylvestris</i>	-	13,0	60,0	-	-	-	não	Brackhage et al., 1996
<i>Quercus robur</i>	-	0,44	-	5,70	-	-	não	Eklund, 1995
<i>Pinus pinaster</i>	4,12	0,23	65,9	3,32	-	38,5	não	Ferretti et al., 1993
<i>Pinus pinea</i>	16,2	2,73	38,5	7,16	-	90,5	não	Ferretti et al., 1993
<i>Acer saccharum</i>	-	-	6,50	0,37	-	-	não	Frelich et al., 1989
<i>Pinus strobus</i>	-	-	10,0	0,27	-	-	não	Frelich et al., 1989
<i>Fagus sylvatica</i>	-	0,90	50,0	6,00	-	-	não	Hagemeyer et al., 1992
<i>Pinus sylvestris</i>	2,00	0,60	12,4	27,0	-	11,7	sim	Hasanen e Huttunen, 1989
<i>Quercus lyrata</i>	7,00	-	25,0	1,10	1,50	-	não	Hupp et al., 1993
<i>Quercus phellos</i>	5,00	-	22,0	2,00	2,50	-	não	Hupp et al., 1993
<i>Pinus taeda</i>	10,0	0,25	48,0	3,00	-	60,0	sim	Jordan et al., 1990
<i>Quercus robur</i>	-	0,03	-	22,0	-	-	não	Kardell e Larsson, 1978
<i>Quercus alba</i>	2,00	-	-	-	-	9,00	não	Long e Davis, 1989
<i>Picea rubens</i>	2,40	-	40,0	-	-	23,8	não	Matusiewicz e Barnes, 1985
<i>Acer saccharum</i>	1,80	-	28,0	-	-	28,3	não	Matusiewicz e Barnes, 1985
<i>Fagus sylvatica</i>	2,40	0,30	44,0	1,60	3,90	109	não	Meisch et al., 1986
<i>Quercus robur</i>	1,90	0,04	180	0,04	-	-	não	Queirolo et al., 1990
<i>Quercus petraea</i>	1,80	0,14	250	0,65	-	-	não	Queirolo et al., 1990
<i>Abies balsamea</i>	18,0	-	50,0	20,0	-	-	sim	Robitaille, 1981
<i>Quercus rubra</i>	-	-	-	8,50	-	-	não	Rolfe, 1974
<i>Dacrycarpus dacrydiodes</i>	50,5	0,19	10,1	3,20	-	-	não	Stewart et al., 1991
<i>Pinus sylvestris</i>	25,0	4,50	6,00	1,50	-	-	sim	Symeonides, 1979
<i>Pinus sylvestris</i>	1,00	0,20	11,0	0,45	0,22	7,50	não	Tendel e Wolf, 1988
<i>Acer pseudoplatanus</i>	25,0	1,70	28,0	6,90	10,0	-	não	Watmough e Hutchinson, 1996
<i>Acer pseudoplatanus</i>	-	-	-	8,20	-	-	não	Watmough et al., 1997
<i>Picea rubens</i>	6,80	-	0,30	-	-	241	não	Zayed et al., 1992

3.6 Dendrocronologia e o monitoramento ambiental

Dendrocronologia (*dendron*, madeira; *chronos*, tempo; e *logus*, estudo) é definida como a ciência de datação de espécies arbóreas por meio dos anéis de crescimento. Suas bases teóricas remontam ao século XVI, com Leonardo Da Vinci. Contudo, somente no início do século XX a dendrocronologia se consolida como ciência, devido, principalmente as contribuições de Andrew E. Douglass, pioneiro no desenvolvimento de metodologias para a avaliação das relações existentes entre séries temporais de anéis de crescimento com fenômenos climáticos e astronômicos, e a datação de madeiras arqueológicas (FRITTS 1976; SCHWEINGRUBER 1988, 1996). As árvores que se desenvolveram em condições semelhantes ao longo de um período de anos devem apresentar sincronismo na variação da largura dos anéis de crescimento permitindo a datação cruzada e a determinação do ano de formação dos anéis de crescimento (BROWN, 2003).

Segundo Tomazello Filho et al. (2001), as árvores reagem às variáveis ambientais (temperatura, precipitação, etc.) que influem em seus inúmeros processos fisiológicos (respiração, fluxo de seiva, transpiração, etc.), o que reflete na atividade cambial e na formação dos anéis de crescimento. Desta forma, as variáveis ambientais que afetam as árvores são registradas no seu lenho, através dos anéis de crescimento, que expressam os eventos ocorridos no passado e no ano corrente.

Entre os fenômenos ambientais analisados, os de origem antropogênica, como a emissão de poluentes, queimadas, aplicação de defensivos agrícolas, atividades mineradoras e da queima de combustíveis fósseis, são de interesse para a dendrocronologia como instrumento de monitoramento ambiental. O método de análise de poluentes nos anéis de crescimento é conhecido por dendroquímica, fundamentado na premissa de que a sua detecção no lenho das árvores indica a sua presença e disponibilidade no ambiente em qual a árvore está se desenvolvendo (AMATO, 1988; HAGEMEYER, 1993).

A aplicação dos anéis de crescimento no monitoramento ambiental foi demonstrada em 1976 e envolve aspectos do comportamento do elemento químico no lenho, a correlação entre os níveis do íon na atmosfera e no lenho, a absorção do elemento químico e sua deposição no lenho e a detecção dos elementos químicos (HAGEMEYER, 1993; WATMOUGH, 1999).

Os pré-requisitos da dendroquímica como ferramenta no monitoramento ambiental foram sumarizados por Hagemeyer (1993), sendo: (i) uma relação distinta e constante deve existir entre a concentração do elemento no ambiente e a quantidade incorporada no lenho das

árvores; (ii) a incorporação do elemento nos anéis de crescimento deve ocorrer, preferencialmente, por um período limitado de tempo; (iii) deve ser conhecido o anel de crescimento no qual os elementos são transportadas, seja no anel de crescimento mais externo ou para os formados anteriormente; (iv) após a incorporação do elemento em um anel de crescimento anual não deve ocorrer a sua remobilização e retranslocação; (v) o padrão de distribuição radial do elemento no lenho deve ser estável durante um longo período de tempo (estabilidade temporal) e (vi) padrões de distribuição radial de um elemento

Todos esses pré-requisitos, provavelmente, não serão completamente atendidos para os distintos elementos e as espécies arbóreas sendo, no entanto, crucial investigar o nível de preenchimento para a eficiência da aplicação da dendroquímica. Ainda, enfatiza-se a importância da distinção dos tipos de lenho das árvores, sendo as coníferas, de estrutura anatômica mais simples e as folhosas com porosidade em anéis porosos e de porosidade difusa (LINDEBERG, 2004).

Em coníferas o movimento ascendente da água passa através de vários anéis anuais na porção periférica do tronco da árvore. Isto significa que os elementos químicos absorvidos pelas raízes irão atingir vários anéis ao mesmo tempo, tornando assim a investigação anual quase impossível. Padrão semelhante de movimento da água é encontrado em madeira de angiospermas com porosidade. No entanto, em estudos com espécies dos gêneros *Quercus*, *Ulmus* e *Faxinus*, foi constatado que o movimento da água fica estrito ao último anel formado, localizado na porção mais periférica do lenho (HAGEMEYER, 1993). Estudos mais recentes indicam, da mesma forma, o potencial das árvores de coníferas, como o *Pinus sylvestris* e de folhosas de porosidade difusa, como a *Betula pendula*, para o monitoramento ambiental (LAH, 2012).

De maneira geral, a literatura reporta que as árvores de espécies de pinheiros são as mais utilizadas em biomonitoramento (WATMOUGH e HUTCHINSON, 1996; GARBE-SCHONBERG et al, 1997; PADILLA e ANDERSON, 2002; WATMOUGH e HUTCHINSON, 2002; BUTKUS e BALTRENAITE, 2007; LAGEARD et al., 2008; MEDEIROS et al, 2008), bem como as árvores de folhosas de porosidade difusa, como o *Platanus occidentalis*, *Betula* spp e *Populus* spp. (GARBE-SCHONBERG et al, 1997; MADEJON et al., 2004; PATRICK e FARMER, 2006; BUTKUS e BALTRENAITE, 2007).

Watmough e Hutchinson (1996) confirmaram a relação entre a composição química da atmosfera e a dos anéis de crescimento de árvores de uma plantação de *Acer pseudoplatanus*, em Liverpool, Inglaterra, distante de 0,5 km de uma refinaria de Cu e Cd, submetida ao

monitoramento ambiental e coleta de dados de deposição seca e úmida desde 1975. Ecklund (1995) determinou uma estreita relação do teor de Cd e Pb nos anéis de crescimento de árvores de *Quercus robur*, Suíça, em relação à distância de uma indústria de baterias e a quantidade de Cd e Pb emitida no ar/ano.

Em Quebec, Canadá, foram amostrados os anéis de crescimento no lenho de árvores de *Picea mariana* próximas às fontes emissoras de Hg, detectando-se concentrações de 13-37 ng/g, sendo transportado pela corrente de ar até as árvores pela orientação geográfica favorável (ZHANG et al., 1995). Da mesma forma, Siwik (2007) analisando as árvores de *Acer* spp., *Quercus* spp, *Populus* spp. e *Salix* spp., em áreas historicamente contaminadas por Hg, em Kingston, Canadá, verificou diferenças significativas na absorção de Hg atmosférico entre as espécies, em relação às suas características químicas e físicas (Figura 3).

No Estado de São Paulo, Brasil, Vives et al. (2006) avaliaram as concentrações de P, K, Ca, Ti, Fe, Sr, Ba e Pb nos anéis de crescimento anuais de árvores urbanas de *Caesalpinia pluviosa*, determinando a cronologia da poluição ambiental e indicando a aplicação da espécie no monitoramento ambiental.

Figura 3 - Concentrações de Hg nos anéis de crescimento de árvores de (A) *Populus* spp., (B) *Salix* spp., (C) *Acer* spp. e (D) *Quercus* spp. ao longo de uma série cronológica, no Canadá. A linha pontilhada representa o limite de detecção. Adaptado de Siwik (2007)

Chiment e Chiment (2005) realizaram um levantamento de referências bibliográficas de mais de 300 trabalhos na base de dados “Science Citation Index” aplicando o termo “dendrochemistry”, listando os trabalhos publicados, no período de 1960-2005, com destaque para os periódicos *Canadian Journal of Forest Research*, *Journal of Environmental Quality*, *Science of the Total Environment*, *Water, Air, and Soil Pollution* e *Environmental Pollution* (Figura 4).

Figura 4 – Número de trabalhos publicados na base de dados “Science Citation Index” no período entre os anos de 1960 e 2005. Fonte: Chiment e Chiment (2005)

Medeiros (2005) apresenta em sua Dissertação de Mestrado uma relação de trabalhos científicos, adaptada de Hagemeyer (1993), publicados em dendroquímica, indicando autor, data, espécie florestal, elemento químico e aplicação no biomonitoramento. Na Tabela 2, a relação é ampliada com a inserção de 39 trabalhos publicados, em sua grande maioria, nos últimos 10 anos.

Tabela 2 - Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

(continua)

Autore(s)	Ano	Gênero(s)	Elemento(s) químico(s)	Monitoramento
Wright e Will*	1957	Pinus	Ca, K, Mg, N, Na, P	n.m.
Orman e Will*	1960	Pinus	Ca, K, N, P	n.m.
Furukawa*	1961	Cedrus, Chamaecyparis, Cryptomeria, Gingko, Larix, Pinus, Taxodium	Ca, K, N, P	n.m.
Schroeder e Balassa*	1961	Ulmus	Cd, Pb	+
Furukawa*	1963	Ailanthus, Alnus, Fagus, Cercidiphyllum, Idesia, Cinnamomum, Prunus, Fraxinus, Lithocarpus, Paulownia, Quercus, Phellodendron, Robinia	Ca, K, N, P	n.m.
Furukawa*	1964	Cryptomeria, Pinus	Ca, K, N, P	n.m.
Galligan et al.*	1965	Pseudotsuga	Mn	n.m.
Ault et al.*	1970	Querus	Pb	?
Holtzman*	1970	Carya, Quercus, Ulmus	Pb	+
Spoza et al.*	1973	Pinus, Quercus	Pb	-
Hampp e Holl*	1974	Acer, Robinia, Tilia	Pb	-
Rolfe **	1974	Acer, Pinus, Quercus	Pb	?
Ward et al.*	1974	Acer, Aesculus, Fraxinus, Platanus, Quercus, Ulmus	Pb	+
Sheppard e Funk	1975	Pinus	Ag, Au, Co, Cr, Fe, Hg, K, La, Mn, Na, Rb, Sb, Zn	+
Suzuki*	1975	Cryptomeria	Cd, Pb, Zn	+
Gilboy et al.*	1976	Ulmus	K	?
Lepp*	1976	Acer, Fagus, Populus, Tilia, Ulmus	Cu, Pb	+
Tian e Lepp*	1977	Acer, Larix	Pb, Zn	?
Ward et al.*	1977	Beilschmiedia	Ag	?
Hermann et al.*	1978	Quercus	Cu, Fe, Mn, Pb, Zn	+
Kardell e Larson*	1978	Quercus	Cd, Pb	?
Gilboy et al.*	1979	Quercus	Cd	+
Symeonides*	1979	Pinus	Cd, Cu, Pb, Zn	?
Ferguson et al.*	1980	Tilia	Pb	-
Schrimpf*	1980	Abies	Cd, Cu, Mn, Pb, Zn	+
Baes III	1981	Liriodendron, Quercus, Carya	Pb	?

Tabela 2 - Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

(continuação)

Autore(s)	Ano	Gênero(s)	Elemento(s) químico(s)	Monitoramento
Baes e Ragsdale*	1981	Carya, Liriodendron	Pb	+
Suzuki*	1981	Cryptomeria	Cd	+
Isermann*	1983	Picea, Prunus, Quercus	Al, Cd, Cu, Mn, Pb, Zn	+
Baes e McLaughlin **	1984	Pinus	Al, Fe, Mo, Ti, Zn	+
Baes et al.*	1984	Pinus	Al, Ca, Cd, Cu, Fe, Mn	+
Kazmierczakowa et al.*	1984	Fagus	Cd, Cr, Fe, Pb, Zn	-
Legge et al.*	1984	Pinus	Al, As, Cl, Cu, Mn, P, Si, Zn	?
Berish e Ragsdale **	1985	Carya	Al, Cd, Cu, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Zn	+
Kosmus e Grill*	1985	Aesculus	Cd, Cu, Pb, Zn	?
McLaughlin e Braker*	1985	Picea	Fe	+
Hagemeyer e Breckler*	1986	Quercus	Cd	-
Taneda et al.*	1986	Castanea, Cryptomeria, Kalopanax, Prunus, Thujopsis	Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Zn	-
Okada et al.*	1987	Cryptomeria	Al, Br, Ca, Cl, Cr, K, Mg, Mn, Na, Rb	-
MacLauchlan et al.*	1987	Alnus	Ca, Cu, Fe, Pb, Sr, Zn	+
Frelich et al.	1988	Pinus, Acer	P, K, Ca, Mg, S, Zn, B, Mn, Fe, Cu, Na, Al, Pb	?
Okada et al.*	1988	Cryptomeria	Cl, K, Mg, Mn	-
Truby*	1988	Abies, Pseudotsuga, Quercus	Pb	-
Hagemeyer et al.*	1989	Fagus	Ca, Cd, K, Mg, Na, Ni, Pb, Zn	-
Long e Davis*	1989	Quercus	Al, B, Ba, Ca, Cd, Co, Cu, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, Si, Sr	-
Queirolo*	1989	Quercus	Cd, Cu, Pb, Zn	?
Hall et al.*	1990	Pseudotsuga	Ce, La, Nd, Sm	+
Okada et al.*	1990	Cryptomeria	Ca, Cl, K, Mg, Mn, Na, Rb	-
Zech et al.*	1990	Fagus	Mg, S	+
Gilfrich et al.*	1991	Quercus, Sassafras	Ca, Cl, Co, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Ti, Zn	?
Guyette et al.	1991	Juniperus	Cd, Pb	+
Ohmann e Grigal*	1991	Abies, Acer, Pinus, Populus	Al, B, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, N, Ni, P, Pb, S, Zn	?
Zayed et al.*	1991	Picea	Al	?
Oliveira et al. **	1994	Pinus	Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, S	?
Martins **	1995	Aspidosperma	Al, C, Ca, Cl, Co, Cr, Fe, H, K, Mn, Ni, O, P, Pb, Rb, S, Si, Sr, Ti, Zn, W	?
Zhang et al. **	1995	Picea	Hg	-

Tabela 2 - Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

(continuação)

Autore(s)	Ano	Gênero(s)	Elemento(s) químico(s)	Monitoramento
Abadei **	1995	Picea	Ca, Cr, Fe, Mn, P	+
Yanosky et al.	1995	Taxodium	Na, Cl, Br	+
Harju et al. **	1996	Pinus, Picea	Ca, Cu, Fe, K, Mn, Zn	+
Watmough e Hutchinson **	1996	Acer	Ca, Cd, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, Sr, Zn	+
Oliveira et al. **	1996	Pinus	Br, Co, Cs, Fe, K, Mn, Na, Rb, Zn	n.m.
Garbe-Schönberg et al.	1997	Pinus, Betula	C, Mg, Al, S, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Sn, Sb, Ba, Pb	-
Larsson e Helmisaari **	1998	Pinus	Ca, Cu, Fe, K, Mn, Ni, Rb, Sr, Zn	+
Watmough et al. **	1998	Acer	Ca, k, Mg, Pb	n.m.
Aoki et al. **	1998	Diospros, Cryptomeria	Ca, Cu, Mn, Rb, Zn	n.m.
Prohaska et al. **	1998	Picea	Al, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Fe, Mg, Mn, Pb, Sr, Zn	?
Watmough et al. **	1999	Acer	Pb	+
Watmough e Hutchinson	1999	Abies	Pb, Cd, Zn	+
Penninckx et al. **	1999	Fagus	Al, Ca, K, Mg, Mn, N, P	?
Martin et al.	2000	Pyrus, Prunus,	As	-
Martin et al. **	2001	Pinus	Ca, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Zn	n.m.
Yanosky et al. **	2001	Quercus	Hidrocarbonetos clorados	-
Penninckx et al.	2001	Quercus, Fagus	N, P, K, Ca, Mg, Mn, Al,	?
Bellis et al. **	2002	Quercus	Pb	+
Watmough	2002	Acer	Al, Ca, Cd, Cu, K, Mn, Mg, Na, Ni, Pb, Rb, Sr, Zn	?
Dongarrà e Varrica	2002	Platanus	¹³C/¹²C	?
Fisher et al. **	2002	Fagus	Ca, Pb	+
Orlandi et al. **	2002	Larix	Cd, Cr, Cu, Ni, Pb	+
Padilha e Anderson	2002	Pinus	Cr, Cu, Zn, As, Pb, Zn, Sr, Cd, Cs, Ba, Ce, Tb	-
Thiry et al. **	2002	Pinus	Cs	?
Martin et al.	2003	Picea	K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn	?
Punshon et al. **	2003	Salix	Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, U	+
Watmough e Hutchinson **	2003	Acer, Tilia, Fagus, Fraxinus	Cu, Cd, Pb, Zn	-
Witte et al.	2004	Picea	Fe, Zn, Cu, Cd, Mn, Pb	-

Tabela 2 - Artigos científicos sobre análise de elementos químicos nos anéis de crescimento de espécies florestais e sua aplicação no monitoramento ambiental

(conclusão)

Autore(s)	Ano	Gênero(s)	Elemento(s) químico(s)	Monitoramento
Augustin et al.	2005	Picea	Mn	+
Drouet et al.	2005	Quercus, Fagus	Ca, Sr	+
Medeiros	2005	Araucaria	Pb	+
Pearson et al.	2005	Pinus	Al, Zn, Ca, Cu	?
Vives et al.	2006	Caesalpinia	P, K, Ca, Ti, Fe, Sr, Ba, Pb	+
Calva-Varquéz et al. 2006	2006	Pinus, Abies	K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr, Pb	+
Cheng et al.	2007	Quercus, Pinus, Juniperus, Carya	As, P	?
George et al.	2007	Quercus	C, Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Sr, Mo, Ag, Cd, Ba, La, Hg, Pb, U	?
Faria	2007	Copaifera	Cr, Ni, Cu, Zn e Pb	+
Sheppard et al.	2007	Populus	Co, W	?
Siwik	2007	Acer, Quercus, Populus, Salix	Hg	+
Pantera et al.	2007	Pinus	Cu, Fe, Zn, Mn, Pb	?
Kirchner et al.	2008	Pinus	Al, Co, Cu, Cd, Mn, Ni, Ba, Sr, Pb	?
Bukata e Kyser	2008	Quercus	Ca, Mn, Mg, Ba, Sr, Pb	?
Monticelli et al.	2009	Larix, Cedrus	Cu, Zn, Cd, Pb, U	?
Yu et al.	2009	Toona, Firmiana	Cd, Mn, P, Zn and Pb	?
Liu et al.	2009	Toona, Firmiana	Cd, Mn, P, Zn, Pb	?
Ünlü et al.	2009	Pinus, Sequoia	A, Br, K, La, Mn, Na, Zn	+
Korori	2010	Platanus	Cd, Pb, Ca	?
Hojdová et al.	2010	Picea, Fagus	Hg	+
MacDonald et al.	2011	Larix, Betula	Pb, Cd, Zn	+
Chen et al.	2011	Pinus	Zn, Cu, Pb, Cd	+
Geraldo	2011	Tipuana	Ti, Cr, Fe, Cu, Zn, Rb, Sr e Pb	+
Bandak	2011	Pinus	Ba, Sr	+
Lah	2012	Pinus, Betula, Populus	Pb, Cd, Zn, Cr, Ni	?
Wagner et al.	2012	Quercus	Ca, K, Mg, Na, N, P	+
Doucet et al.	2012	Picea, Fagus	Cd, Zn e Pb	+

* citado por Hagemeyer (1993), ** citado por Medeiros (2005) - referências em **negrito** foram adicionadas - Dendroquímica como ferramenta no monitoramento ambiental, sendo (+) possível; (?) questionável ou aplicável para somente alguns elementos; (-) não aplicável; (n.m) não mencionado ou não estudado. Adaptado e ampliado de Hagemeyer (1993) e Medeiros (2005)

3.7 Técnicas de detecção de elementos químicos em anéis de crescimento

Os estudos em dendroquímica mais antigos aplicavam, no geral, a Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) na determinação da composição elementar dos anéis de crescimento das árvores (BARNES et al., 1976; ROBITAILLE 1981). Os fatores limitantes da técnica, em relação aos padrões atuais, são o nível de detecção e a impossibilidade de análises multielementares. No entanto, Brackhage et al. (1996) e Frelich et al. (1989) obtiveram níveis melhores de alguns elementos pelo uso de forno grafite na etapa de atomização, no lugar de chamas. As dificuldades na determinação da composição elementar de anéis de crescimento levaram à utilização de grupos de 5, 10 a 20 anéis de crescimento nas análises com AAS aumentando a quantidade a massa de lenho e inviabilizando a detecção de variações no ambiente em escala anual (ROLFE 1974; BAES e MCLAUGHLIN 1987; GUYETTE et al. 1991). Nos trabalhos recentes, observa-se o aporte de novas técnicas de determinação elementar, resultando em avanço nos estudos de dendroquímica e possibilitando uma interpretação mais precisa dos resultados, com a diminuição dos níveis de detecção, o aumento do espectro de elementos analisados e a redução da preparação e diminuição do risco de contaminação das amostras (WATMOUGH, 1997).

As técnicas mais comumente usadas relatadas na literatura são: a análise por ativação neutrônica (NAA) (GILBOY et al. 1979; GUYETTE et al., 1989), a emissão de raios-X induzida por partículas (PIXE) (HALL e NAUMANN, 1984a ; HALL e NAUMANN, 1984b; LEGGE et al., 1984), a cromatografia iônica (FERRETTI et al., 1992), a fluorescência de raios X (XRF) (INJUK et al., 1987), a voltametria de redissolução anódica (VRA), (QUEIROLO e VALENTA, 1987), a espectrometria de massa de íons secundários (SIMS) (MARTIN et al., 1997), a espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (ICP-MS) (HALL, 1990, PADILHA E ANDERSON, 2002) e a amostragem por ablação a laser em conjunto com a espectrometria de massas com fonte de plasma indutivamente acoplado (LA-ICP-MS) (HOFFMANN et al, 1994; WATMOUGH et al., 1997; BUKATA e KYSER, 2008).

Destas técnicas merece destaque, pelo grande número de trabalhos publicados nas duas últimas décadas, a do LA ICP-MS, que propicia metodologia não destrutível e replicável para a determinação de muitos elementos no lenho das árvores com elevada resolução espacial (WATMOUGHT, 1997). Os limites de detecção para as análises por LA-ICP-MS são melhores que 1 ppm (parte por milhão) para quase todos elementos da tabela periódica, chegando a valores menores que 1 ppb (parte do bilhão) para os elementos mais pesados

com $Z > 37$ (MONTASER, 1998). Apresenta, ainda, como vantagem, a ausência da etapa de pré-tratamento químico das amostras do lenho reduzindo o risco de contaminação e simplificando o processo de preparação das amostras. Também, são necessárias pequena quantidade de amostra do lenho para a ablação a laser e a reduzida dimensão do ponto de avaliação (30 μm) permite discriminar zonas específicas, como o lenho inicial e tardio de anel de crescimento anual (DONEGAN, 2011).

Watmough (1997) adverte que a escolha da técnica analítica a ser utilizada depende muitas vezes do seu custo, disponibilidade de equipamentos caros, e do propósito do estudo. Técnicas com alta sensibilidade na determinação elementar, como é o caso da ICP-MS, podem ter um custo mais elevado por amostra, no entanto, se existe o interesse em determinar mais de um elemento (ou isótopo), então o custo por elemento torna-se reduzido.

Trabalhos realizados na última década mostram, ainda, que outras técnicas analíticas, ou mesmo o emprego de técnicas conjuntas, foram aplicadas no estudo de anéis de crescimento, sendo alguns deles citados nos próximos parágrafos.

A metodologia de fluorescência de raios X por dispersão de energia (EDXRF) e por reflexão total (TXRF) foi utilizada por Simabuco (2002) para quantificar o nível de poluição do ar pela análise dos tecidos vegetais distribuídos em áreas de grande concentração de indústrias e de intenso tráfego de veículos; os métodos de análise têm a vantagem de preservar as amostras, permitindo a realização de análises de comprovação.

No México, Vaquéz et al. (2006) aplicaram simultaneamente os métodos de feixe iônico PIXE e RBS (*Rutherford Backscattering Spectroscopy*) em árvores de *Pinus montezumae* e *Abies religiosa* para a determinação de elementos típicos como o K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Br, Sr e Pb nos anéis de crescimento e de C e O da matriz da madeira.

As concentrações de P, K, Ca, Ti, Fe, Sr, Ba e Pb nos anéis de crescimento anuais de árvores urbanas de *Caesalpinia peltophoroides*, no estado de São Paulo, foram determinadas por Vives et al. (2006), estabelecendo-se uma cronologia da poluição ambiental através das técnicas de dendrocronologia e da aplicação da fluorescência de raios x por reflexão total com radiação síncrotron (SR-TXRF). Esta mesma técnica foi utilizada por Faria (2007) na determinação de contaminantes em uma sequência de anéis de crescimento datados do lenho de árvores de *Copaífera langsdorfii*, no município de Bauru/SP.

Chagas (2009) determinou a concentração de Hg no lenho de árvores de 4 espécies exóticas que cresceram próximas de empresa de reciclagem de Hg, no distrito industrial de

Paulínia, São Paulo, por espectrofotometria de absorção atômica com sistema de geração de vapor atômico a frio (CVAAS).

A metodologia do LIBS é das mais recentes e versáteis técnicas aplicadas na avaliação da composição química de materiais biológicos, entre eles os anéis de crescimento (KAISER et al., 2012), sendo apresentada no item a seguir.

3.8 Aplicação de LIBS em anéis de crescimento do lenho

A proposição da espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser (LIBS) como técnica espectroanalítica para a análise direta de amostras data do ano 1964. Embora tenha surgido há quase 50 anos, o desenvolvimento de trabalhos com LIBS foi impulsionado somente a partir do início da década de 90 com o surgimento de equipamentos comerciais com sistemas óticos dispersivos de alta resolução, em um amplo intervalo espectral e desenvolvimento de detectores mais sensíveis (RADZIEMSKI, 2002).

Nunes (2010) e Carvalho (2011) destacam LIBS como uma técnica multielementar versátil, que apresenta características importantes como: (i) análises diretas e rápidas ($< 1-10$ s), *in situ*, *in vivo* e em movimento; (ii) as massas amostradas variam entre 0,1 e 250 μg , em função das características da amostra e do laser; (iii) pode dispensar totalmente o preparo da amostra; (iv) aplicável para análise de gases, líquidos e sólidos, (v) a limpeza e/ou remoção de películas sobre a superfície a ser analisada pode ser feita programada, aplicando-se alguns pulsos e (vi) possibilita a análise de materiais de difícil dissolução.

Ainda segundo esses autores, e de acordo com o esquema apresentado na Figura 5, um sistema LIBS típico é constituído pelos seguintes componentes: (i) laser pulsado com energia suficiente para formação do plasma; (ii) sistema óptico para focalizar a energia do laser na superfície da amostra; (iii) sistema óptico (telescópio) para coletar a radiação emitida pelo plasma e focalizá-la na fenda de entrada do espectrômetro; (iv) sistema porta-amostra com deslocamento X-Y; (v) detector para medidas simultâneas das radiações emitidas nas regiões UV e visível do espectro eletromagnético e (vi) microcomputador para o controle do laser e do espectrômetro, assim como para aquisição e processamento dos espectros de emissão.

Figura 5 - Arranjo típico de um sistema LIBS. Figura adaptada de www.photonetc.com

Nesse sistema, a excitação da amostra é baseada em um laser pulsado que é focalizado, através de uma lente convergente, em uma pequena área da superfície da amostra. Como resultado, a energia aplicada aquece a amostra vaporizando uma pequena quantidade de material, e ainda ioniza a matéria próxima ao ponto de incidência, produzindo um plasma com elevada temperatura. Assim, parte da luz emitida pelo plasma é capturada por um sistema óptico e transferida para um espectrômetro que dispersa as radiações emitidas pelas espécies atômicas e iônicas excitadas, característicos dos elementos presentes na amostra. O registro dos sinais de emissão é feito por um detector e, na sequência, computado, sendo a intensidade de emissão dos elementos químicos utilizada como resposta analítica.

Na última década observou-se um crescimento significativo dos estudos que aplicam o LIBS na análise de materiais biológicos (CARVALHO, 2011), como os tecidos de plantas de interesse agrônomo, de microorganismos e de tecidos de animais; a literatura sobre a aplicação no lenho das árvores é escassa (KAISER et al., 2012). Neste contexto, Moskal e Hahn (2002) foram um dos pioneiros na concepção e implementação de um sistema detector portátil LIBS para análise *in situ* de peças de madeira tratadas com arseniato de cobre cromatado (CCA), em um centro de reciclagem e resíduos de construção e demolição, permitindo a distinção entre amostras tratadas e não tratadas a partir do sinal de emissão atômica de cromo.

Da mesma forma, Martin et al. (2005) aplicaram LIBS para identificar tipos de preservativos (arseniato de cobre cromatado (CCA), arseniato de cobre amoniacal (ACA) e

quaternários de amônio (ACQ)) aplicados em peças de madeira das espécies *Tsuga canadensis* e *Pseudotsuga menziesii*, determinando o conteúdo de Cu, As, Zn e Cr. A aplicação de LIBS como ferramenta de avaliação da qualidade da madeira de *Quercus spp* e de *Pinus taeda* in natura e durante os distintos processos químicos de transformação em outros produtos foi testada por Potter (2006), determinando-se os teores de Al, Ca, Cl, K, Mg, Na, P, Si e Ti.

Em outro trabalho, Martin et al. (2007) demonstraram que a utilização de LIBS em combinação com a análise estatística multivariada pode ser empregada na determinação da composição química de anéis de crescimento do lenho de árvores de *Pinus palustris*, correlacionando-se os resultados obtidos com parâmetros externos como mudanças climáticas, eventos de incêndios e distúrbios ambientais envolvendo atividades humanas.

Recentemente, utilizou-se LIBS para o monitoramento ambiental espacial/temporal área industrial de extração de óleo e de gás natural, através de perfuração hidráulica na Pensilvânia, EUA, por Bandak (2011), elucidando-se o processo de contaminação da água e do solo por Ba e Sr.

Os resultados da determinação do conteúdo de Al, B, Ca, Mg, Zn, Cu, Mn, Fe, Na, e Si no lenho, por LIBS, avaliados através da análise de componentes principais (PCA), permitiu a separação das quatro espécies arbóreas do estudo (*Cedrela fissilis*, *Ocotea porosa*, *Hymenolobium petraeum* e *Aspidosperma subincanum*) (CORDEIRO et al., 2011).

Wagner et al (2012), em um estudo inédito, avaliou o crescimento e o estado nutricional de um plantio de árvores de duas espécies do gênero *Quercus*, com 13 anos de idade, submetidas a 3 regimes manipulados de precipitação (úmido, seco e controle), utilizando LIBS para a determinação de Ca, K, Mg, Na, N e P. Os resultados do trabalho indicaram potenciais reduções de crescimento a longo prazo para as árvores da espécie sobre o regime de mudanças climáticas.

3.9 O Parque Industrial de Paulínia- SP como fonte de poluição ambiental

O município de Paulínia localiza-se na região nordeste do Estado de São Paulo, com uma área de 145 km² e população de 81 mil habitantes (IBGE, 2010). Possui uma frota de cerca de 20.000 veículos leves, 3.000 veículos pesados e 3.500 motocicletas e 350 estabelecimentos industriais, sendo conhecido como a maior potência petroquímica da América Latina.

O parque industrial de Paulínia é considerado um pólo atrativo para a expansão industrial devido a sua localização estratégica, a presença de refinarias, de facilidades de escoamento de produtos e de matérias-primas, proximidade do mercado consumidor e disponibilidade de mão de obra qualificada. Como resultado da instalação de grandes indústrias no município, observam-se sinais importantes de degradação ambiental em vários aspectos (CLEMENTE, 2000).

A CETESB mantém na cidade 2 estações de monitoramento de fumaça, sendo que as amostragens são realizadas a cada 24 horas, em 6 dias/semana. Desde o ano de 2000, são monitoradas as partículas inaláveis (MP_{10}), dióxido de enxofre (SO_2), ozônio (O_3), óxidos de nitrogênio (NO e NO_2) e parâmetros meteorológicos (direção e velocidade de vento, temperatura e umidade relativa, pressão e radiação solar). O parâmetro partículas inaláveis é definido como o material particulado com diâmetro aerodinâmico menor que $10\mu m$, sendo emitido por veículos automotores, queima de biomassa, operação de processos industriais, re-suspensão da poeira do solo, etc. A estimativa das emissões de material particulado (ton./ano) das principais indústrias inventariadas pela em CETESB, em Paulínia, em 2005 é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Estimativa de emissões atmosféricas relativas à queima de combustíveis nas fontes estacionárias no município de Paulínia

Empresa	Emissões de Material Particulado (ton./ano)
Petrobrás-Replan	1416,8
Galvani	258,6
Rhodia	87,1
Degussa	29,8
Bann	5,0
Orsa	4,7
Nutriara	3,6
Agribands	1,7
Silcon	1,6
Syngenta	1,6
Hércules	1,0
Dupont/Invista	0,7
Moinhos Cruzeiro do Sul	0,6
Kraton	0,4

Fonte: CETESB (2006)

No entanto, a concentração de metais nas partículas finas e ultrafinas do ar atmosférico é raramente determinada, sendo indispensável o seu monitoramento pelos estudos que demonstram o efeito perigoso para o ser humano, pois penetram nos alvéolos pulmonares e estão ligadas a doenças cardiovasculares e respiratórias (KAMPA e CASTANAS, 2008).

O Relatório de Qualidade do Ar do Estado de São Paulo, elaborado pela CETESB e publicado no ano de 2011, apresenta a evolução do número de dias em que houve a ultrapassagem do padrão de qualidade ar (PQAr) no período 2002-2011, para os parâmetros já citados. Para a cidade de Paulínia, merece destaque os resultados de O_3 , em que o PQAr foi ultrapassado até 39 vezes em um ano, MP_{10} , cujas concentrações médias diárias ($119 \mu g/m^3$) e anuais ($47 \mu g/m^3$) encontram-se muito próximas ao limite para ultrapassagem do PQAr (diário $150 \mu g/m^3$ e anual $50 \mu g/m^3$) e SO_2 , que embora as concentrações médias diárias e anuais tenha sido abaixo do padrão, são as maiores do interior do Estado de São Paulo.

Tresmondi (2003) avaliou a qualidade do ar em Paulínia e região durante o período de março de 2000 a julho de 2002 para verificar o nível de poluição em diferentes locais sob a influência do pólo industrial existente no município. Foram aplicados os monitores contínuos de SO_2 , NO , NO_2 , CO , O_3 , MP_{10} e H_2S . Os resultados das concentrações dos poluentes obtidos permitiram concluir que O_3 é um problema de qualidade do ar na região e que as partículas inaláveis apresentam potencial de ultrapassagem de padrão anual. Foram detectadas como fontes principais poluição: os veículos, a queima de combustível fóssil, o transporte de pluma de região industrializada para outros locais e fontes pontuais de emissão de SO_2 .

Michelazzo (2003) avaliou a influência das emissões antrópicas, da sazonalidade, dos parâmetros meteorológicos e da qualidade do ar sobre a concentração de mercúrio gasoso e particulado na atmosfera da região de Paulínia (SP). Os resultados obtidos foram comparados aos dados encontrados na literatura para regiões que sofrem influência de emissões. Dentre as variáveis climáticas, a autora concluiu que a temperatura e umidade são os parâmetros que parecem ter a maior influência sobre as concentrações de mercúrio na atmosfera da região.

No período de 2002 e 2003, Amorim (2004) realizou o monitoramento e a caracterização do MP_{10} presente na atmosfera da cidade de Paulínia. Os resultados obtidos comprovaram que a concentração de material particulado no inverno é maior que no verão e que há um comportamento sazonal da concentração de MP_{10} ao longo do ano. Foram verificadas três ultrapassagens do padrão diário estabelecido pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) ($150 \mu m/m^3$) e também ultrapassagem do valor anual ($50 \mu m/m^3$). O padrão diário ($65 \mu m/m^3$) estabelecido pelo *Environmental Protection Agency* (EPA – EUA)

para $MP_{2,5}$ foi ultrapassado três vezes durante o período e também foi observada a ultrapassagem do padrão anual que é de $15 \mu\text{m}/\text{m}^3$.

No município de Paulínia, distrito de Betel, Chagas (2009) avaliou o efeito da manipulação incorreta de resíduos de materiais por empresa de reciclagem de Hg, de 1986-1993, que provocou a suspensão e carreamento de material particulado com Hg para o ambiente externo. Os resultados da amostragem realizada 14 anos depois indicaram a contaminação do solo e altas concentrações de Hg no lenho das árvores de 5 espécies nas áreas adjacentes à empresa.

Apesar dos estudos, pouco tem sido realizado na avaliação da situação atual e passada da poluição do ar da região, visando desenvolver uma base de conhecimento e subsidiar o estado na definição de políticas públicas e os empreendedores na decisão de investimentos na região. Neste contexto, o biomonitoramento pode ser aplicado como uma ferramenta na avaliação temporal das mudanças no ambiente (ARNDT e SCHWEIZER, 1991).

3.10 Características das espécies do estudo

Caesalpinia pluviosa var. *peltophoroides*

Caesalpinia pluviosa, da família Fabaceae (Caesalpinioideae), popularmente conhecida como sibipiruna, falso-pau-brasil mucitaíba-verdadeira, coração-de-negro, entre outros, é uma espécie ornamental e com um bom potencial madeireiro. No Brasil, ocorre naturalmente no bioma Mata Atlântica e em outras formações vegetacionais como em ambientes fluviais ou ripários (EMBRAPA, 2011) e em brejos de altitude nordestinos ou disjunções da Floresta Ombrófila Aberta (VELOSO et al., 1991). Trata-se de uma espécie secundária inicial, rara, que ocupa o estrato médio da floresta (CARVALHO, 2003).

Pode ser utilizada em plantios mistos para recuperação de áreas degradadas e, principalmente, no paisagismo, sendo pouco exigente com relação ao tipo de solo. Floresce a partir do final de agosto, prolongando-se até meados de novembro. Os frutos amadurecem desde o final de julho a meados de setembro (LORENZI, 1992).

As árvores são perenifólias, que atingem até 28 m de altura e 50 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo), na idade adulta. Possuem tronco mais ou menos reto, cujo fuste mede até 7 m de comprimento. São cimosas ou dicotômicas, de copa arredondada, moderadamente ampla, de até 6 m de diâmetro com colorido verde muito

vistoso (Figura 6A). Na época da brotação, suas folhagens são vermelho-bronzeada. A casca externa ou ritidoma é áspera, cinzenta, fissurada e com marcas horizontais, resultantes das lenticelas, e pode medir até 5 mm de espessura (Figura 6D). A casca interna é amarelo-clara. Suas folhas são bipinadas, imparipinadas, alternas, sem estípulas, com 8 a 9 pares de pinas e uma solitária, no ápice; o pecíolo mede de 2 cm a 10 cm de comprimento; cada pina com 11 a 13 pares de folíolos alternos, pequenos, falciformes ou rômbicos, quase glabros, com a base assimétrica (Figura 6B). Inflorescências reunidas, voltadas para o alto, em ráceros densos, terminais, cônicos, articuladas acima do meio do pedicelo longo, conferindo-lhe um aspecto de singular beleza (Figura 6B). As flores são hermafroditas, abundantes e amarelas. O fruto é um legume lenhoso, plano, duro, deiscente, oblíquo, oblongo-lanceolado ou falcado, seco liso, coriáceo, bivalvo com as valvas torcidas após a abertura, com deiscência explosiva, medindo de 7,6 cm a 12,0 cm de comprimento por 2,7 cm a 3,1 cm de largura, com um sulco em cada sutura e uma a cinco sementes (CARVALHO, 2003; Figura 6C).

Sua madeira é pesada, dura e de média durabilidade, com massa específica aparente de 0,97 g/cm³, sendo utilizada na construção civil e na produção de móveis. O cerne é distinto do albúrneo, devido à cor escura, sendo o albúrneo de cor clara (PAULA e ALVES, 2007).

Figura 6 – Características gerais das árvores de *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides*: (A) Porte, (B) Folhas e inflorescências, (C) Frutos e sementes e (D) Tronco e casca

Tabebuia pentaphylla

Originárias de El Salvador, as árvores de *Tabebuia pentaphylla*, da família Bignoniaceae, são popularmente conhecidas como ipê rosa e ipê de El Salvador.

No Brasil, são amplamente utilizadas na arborização de parques, ruas e avenidas de inúmeras cidades. É uma espécie tropical, rústica, de rápido crescimento, adaptada às regiões de clima quente e não recomendada para cultivo nas regiões de ocorrência de geadas

frequentes no inverno. Geralmente perdem totalmente as suas folhas antes do florescimento (agosto-outubro) e, não raro, as mantêm parcialmente. As árvores podem alcançar 15-20 m de altura, são semidecíduas (Figura 7A), casca levemente fissurada no sentido longitudinal, com estrias claras e lenticelas esparsas (Figura 7D). Possuem ramagem longa, formando copa alongada; folhas grandes, decíduas e semi-decíduas, compostas digitadas, de pecíolo longo, opostas, com cinco folíolos verde-escuro de textura rija e com pecíolos longos, amarelos, ovalado-alongado, o central maior, de ápice alongado, de 12-18 cm de comprimento (Figura 7B); inflorescências terminais densas, em panículas volumosas, com flores campanuladas com cinco recortes, de colorido variável, desde branco a rosa-claro e rosa-escuro (Figura 7B), formadas de agosto a outubro. Produzem frutos que são cápsulas semelhantes a vagens longas, mais ou menos cilíndricos, deiscentes, com sementes aladas numerosas (Figura 7C) (LORENZI et al., 2003).

A casca das árvores de ipê-rosa pode ser aplicada no tratamento de diversas doenças (amigdalite, estomatites, infecções renais, úlceras, varizes, etc.), além da sua aplicação como anti-diarréico, anti-inflamatório, anti-infeccioso, anti-tumoral, depurativo febrífugo e cicatrizante (PRAKASH e SINGH, 1980).

O lenho é de cor clara, de pardo a rosa, de densidade média-alta, cuja massa específica aparente é de 0,60 g/cm³ (CHAGAS, 2009). Segundo Shrama et al. (2001), não se encontrada na literatura especializada estudos das as características mecânicas e aspectos tecnológicos da madeira de *Tabebuia pentaphylla*, somente alguns relatos de um componente químico isolado da região do cerne, conhecido como tecomaquinona, de ação anti-oxidante.

Figura 7 – Características gerais das árvores de *Tabebuia pentaphylla*: (A) Porte, (B) Folhas e flores, (C) Frutos e sementes e (D) Tronco e casca. Fonte: Lorenzi (2003)

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização dos sítios de estudo

Na seleção dos sítios de estudo considerou-se o histórico da poluição ambiental documentado por instituição de pesquisa, órgão governamental e através de estudos de monitoramento e a ocorrência de árvores de espécies com potencial para aplicação dos anéis de crescimento do seu lenho.

Foram selecionados três locais no município de Paulínia e um em Piracicaba/SP (Figura 8), estabelecendo-se um gradiente de qualidade do ar para a avaliação do potencial dos anéis de crescimento como biomonitores ambientais, atendendo-se os critérios anteriormente citados. São eles:

Sítio urbano: localizado no Distrito de Betel (22° 47' 39'' lat. sul, 47° 07' 19'' long. oeste, 590 m alt.), considerado uma das regiões mais desenvolvidas economicamente de Paulínia, possui um pólo de indústrias nas margens das avenidas Benedito Montenegro, Irene Karsher e João Baldin. Algumas das indústrias do setor químico que atuam na região aparecem no relatório de áreas contaminadas e reabilitadas do Estado de São Paulo, elaborado pela CETESB no ano de 2009. Somado a este fator, estudos apontam que a qualidade do ar atmosférico é diretamente afetada pela presença dessas indústrias (CLEMENTE, 2000; TRESMONDI, 2003; MICHELAZZO, 2003; AMORIM, 2004; FOSTIER, 2005), atingindo níveis críticos durante alguns meses do ano (CETESB, 2009). A presença de poluentes na região também foi constatada em análises de solo e de vegetação (JARDIM, 2005; SILVA, 2005, CHAGAS, 2009). Este sítio é caracterizado por ser uma área urbana pouco construída onde ainda se observa vazios urbanos, mas, no entanto, com intenso tráfego veicular, principalmente de veículos pesados.

Sítio periurbano: compreende três bairros do município de Paulínia, considerados novos, distantes cerca de 10 km do aglomerado industrial, sendo eles: Jardim Harmonia, Belvedere do Lago e Nova Veneza. São bairros bem arborizados, próximos às margens do rio Atibaia, majoritariamente compostos por pequenas chácaras, com áreas pouco construídas ou adensadas, consideradas zonas em expansão cujas paisagens possuem características mais antrópicas do que naturais.

Sítio rural: em decorrência da ausência de um número mínimo de exemplares para uma amostragem estatística confiável de uma das espécies do estudo (*Tabebuia pentaphylla*), além de um local na cidade de Paulínia, outro foi selecionado para compor este sítio de estudo, no

município de Piracicaba-SP, distante, em média, em 60 km dos sítios urbano e periurbano, com características edafoclimáticas semelhantes. Em Paulínia, a paisagem do sítio rural, localizado próximo às margens da Rodovia PLN-040, é composta principalmente por áreas agrícolas (em sua grande maioria plantios de cana-de-açúcar), pastagens e pequenos fragmentos florestais, com poucas áreas construídas, em uma região limítrofe aos municípios de Sumaré e Nova Odessa. Tido como a principal área verde da cidade de Piracicaba - SP, o segundo sítio rural escolhido fica no interior do Parque da ESALQ/USP e caracteriza-se por possuir uma coleção de espécies botânicas regionais e exóticas, distribuídas em 24 maciços arbóreo/arbustivos, de grande valor científico e histórico (ENGEL, 1985; GOLDENBERG, 1991; BARBIN, 1999).

Figura 8 – Localização dos sítios de estudo (urbano, periurbano e rural) nos municípios de Paulínia e Piracicaba/SP

O clima da região de Paulínia, segundo classificação de Köppen, é do tipo Cwa (mesotérmico de inverno seco), com 1.381 mm de precipitação anual, 16,7 mm de deficiência hídrica (junho-setembro) e 361,1 mm de excedente hídrico (novembro-março) (SOIL SURVEY STAFF, 1999). A temperatura média anual é de 22,4°C, enquanto a temperatura

média do mês mais quente é de 28,1 °C (janeiro) e a do mês mais frio de 15,3 °C (julho) (Figura 9; CEPAGRI, 2011).

Também classificado com do tipo Cwa, o clima do município de Piracicaba caracteriza-se por possuir a temperatura média do mês mais quente de 23,9 °C (janeiro) e a do mês mais frio de 16,1 °C (julho) e pluviosidade anual entre 1.200 e 1.300 mm.

O solo do município de Paulínia é caracterizado por conter 4 horizontes, sendo (i) aterro argiloso-arenoso, amarronzado, com espessura de 1,0-2,4 m, (ii) argila preta, com grande quantidade de folhas e raízes, correspondente ao solo original, (iii) argila plástica acinzentada e (iv) argila siltosa, pouco arenosa com presença de matéria orgânica (GEOKLOCK, 2003).

O solo do Parque da ESALQ/USP é classificado como litossolo vermelho, com horizonte A moderado, textura argilosa a muito argilosa, boa drenagem, coloração arroxeada, com estrutura em blocos subangulares no horizonte B e formado a partir de rochas básicas (VIDAL-TORRADO e SPAROVEK, 1993).

Para a verificação dos parâmetros de fertilidade, amostras de solo dos 3 sítios foram coletadas a 1 metro de distância da base do tronco e sob a projeção da copa das árvores amostradas, em profundidade de 0-20 cm, com auxílio de um trado, previamente lavado com ácido nítrico 10% (HNO₃ 10%) e com acetona Analar e água destilada após cada inserção no solo. Para esta etapa, foram coletadas 4 amostras de solo por espécie/sítio, totalizando 24 amostras.

Figura 9 – Médias mensais de temperatura (°C) e de precipitação acumulada (mm) dos últimos 20 anos para os municípios de Paulínia e Piracicaba/SP. Fonte: CEPAGRI (2012)

As amostras foram secas ao ar por um período de 72 horas e em seguida obtidas amostras compostas, resultado do agrupamento, homogeneização e peneiragem das amostras do mesmo sítio (3) e espécie (2), com exceção daquelas do sítio periurbano, subdivididas em

4 grupos em função da distância entre elas . Dessa forma, 300g de solo de 8 amostras compostas foram pesados, embalados e enviadas para análise no Instituto Agrônomo de Campinas (IAC). As determinações e os métodos empregados na análise do solo, referentes aos teores fitodisponíveis, são sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Determinações e métodos aplicados na análise de solo

Determinações	Metodologia	Unidade
Al	cloreto de potássio 1mol/l	mmolc/dm ³
B	água quente	mg/dm ³
Ca	resina	mmolc/dm ³
Cd	DTPA	mg/dm ³
Cr	DTPA	mg/dm ³
Cu	DTPA	mg/dm ³
Fe	DTPA	mg/dm ³
K	resina	mmolc/dm ³
Mg	resina	mmolc/dm ³
Mn	DTPA	mg/dm ³
Ni	DTPA	mg/dm ³
P	resina	mg/dm ³
Pb	DTPA	mg/dm ³
Zn	DTPA	mg/dm ³
C.T.C.	cálculo	mmolc/dm ³
H+Al	tampão SMP	mmolc/dm ³
M.O.	fotométrico	g/dm ³
pH	cloreto de cálcio 0,01mol/l	-
S.B.	cálculo	mmolc/dm ³
V%	cálculo	%

4.2 Seleção das espécies para o estudo

Na seleção das árvores e das espécies amostradas, os seguintes critérios foram considerados: (i) potencial das espécies para o desenvolvimento de estudos dendrocronológicos, (ii) proximidade em relação às fontes de emissão de poluentes, (iii) idade superior ao início do período de monitoramento realizado pela CETESB; (iv) existência de número mínimo de exemplares para a amostragem estatística confiável; (v) posição no estrato dominante para eliminar a competição de outras árvores, que induz a formação de anéis de crescimento anuais de conformações diferenciadas, (vi) indivíduos livres de injúrias mecânicas e da presença de agentes xilófagos deterioradores e (vii) possibilidade de se

encontrar indivíduos das mesmas espécies em locais livres da influência da poluição atmosférica para serem aplicadas como controle.

Neste contexto, foram selecionadas árvores das espécies *Caesalpinia pluviosa* DC. var. *peltophoroides* (Benth.) e *Tabebuia pentaphylla* (Linn.) Hemsl., cujas características aparecem descritas no item 3.10. Trata-se de espécies amplamente utilizadas na arborização de ruas, avenidas e parques no Brasil (YAMAMOTO et al., 2007) e em estudos que versam sobre o potencial da aplicação de seus anéis de crescimento em estudos dendrocronológicos e no monitoramento ambiental (VIVES et al., 2006; CHAGAS, 2009).

Durante a etapa de identificação das árvores em campo, foi obtido o dado dendrométrico diâmetro a altura do peito (DAP; 1,30m de altura do solo) para todas as árvores.

4.3 Coleta das amostras do lenho das árvores: caracterização anatômica macro e microscópica, densitometria de raios X e dendrocronologia

Para a descrição da estrutura anatômica macro e microscópica do lenho das espécies, 4 árvores por espécie foram amostradas (total de 8 amostras), no sítio rural (Paulínia e Piracicaba), com um extrator motorizado Tanaka TED 262R acoplado a sonda metálica curta (15 mm de diâmetro), próximo à altura da base da árvore.

Amostras do lenho de 64 árvores (26 árvores de *C. pluviosa* e 38 árvores de *T. pentaphylla*) foram coletadas através do método classificado como não destrutivo, que consistiu na retirada de 3-4 cilindros do lenho/árvore, totalizando 177 amostras, pela introdução no tronco de uma sonda de incremento (5,15 mm de diâmetro), na altura do DAP (Figura 10), aplicadas nas análises de densitometria de raios-X e dendrocronológicas.

Figura 10 – Coleta das amostras do lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* no sítio urbano

4.4 Coleta das amostras do lenho das árvores: análises químicas

De 4 a 6 amostras por espécie e por sítio foram coletadas (total de 32 amostras) através do método não destrutivo, conforme descrito anteriormente, porém com alterações que objetivam evitar a contaminação proveniente do manuseio da amostra. Para tanto, foram adaptados os métodos utilizados por Hall (1990) e Watmough e Hutchinson (1996). Para cada árvore, foram retiradas 2 baguetas (amostras), perpendiculares entre si, na altura do DAP, utilizando uma sonda de incremento previamente lavada com ácido nítrico 10% (HNO_3 10%). Após cada inserção da sonda, procedeu-se uma nova lavagem com acetona Analar e com água destilada e deionizada. Uma vez retiradas, as amostras foram imediatamente colocadas em embalagens plásticas e transportadas. No laboratório, a superfície de cada bagueta foi limpa usando ácido nítrico 10% (HNO_3 10%), seguido por água destilada e deionizada. No total 32 árvores foram amostradas nos 3 sítios de estudos, sendo 14 de *C. pluviosa* e 18 de *T. pentaphylla*.

4.5 Caracterização anatômica macro e microscópica do lenho das árvores

Os cilindros de lenho extraídos do tronco foram orientados no plano transversal, imersos em água e glicerina em ebulição para o amolecimento. Em seguida, foram fixados no micrótomo de deslize e obtidos cortes histológicos transversais finos (15-20 μm de espessura), transferidos para vidros de relógio, clarificados (hipoclorito de sódio, 20%), lavados (ácido acético, 1%), desidratados (série alcoólica, 20-100%), lavados (acetato de N -Butila), corados

(safranina) e montados em lâminas de vidro (bálsamo do Canadá) (JOHANSEN, 1940; SASS, 1951). As seções do lenho nas lâminas histológicas semi-permanentes foram examinadas em microscópio de luz ZEISS Axioskop, acoplado a uma câmera digital LEICA EC2 e coletadas as imagens, seguindo-se a descrição anatômica microscópica. Os mesmos corpos-de-prova utilizados na confecção de lâminas histológicas, que tiveram suas seções transversais polidas com micrótomo, foram examinados em microscópio estereoscópio ZEISS Stemi SV11, acoplado a uma câmara digital, para a coleta de imagens macroscópicas.

A descrição da estrutura anatômica macro e microscópica do lenho e dos anéis de crescimento das árvores foi realizada segundo a “List of Microscopic Features for Hardwood Identification” da IAWA (IAWA COMMITTEE, 1989).

4.6 Análise densitométrica dos anéis de crescimento do lenho das árvores

Para a obtenção dos perfis radiais de densidade aparente do lenho das árvores através da densitometria de raios-X, das 64 árvores amostradas pelo método não destrutivo (11A), 16 foram selecionadas (8 árvores/espécie).

As amostras radiais, secas em condições naturais, foram coladas em suportes de madeira e seccionadas no sentido transversal (2,0 mm de espessura) em aparelho de dupla serra circular paralela (Figura 11B). Depois de cortadas, foram acondicionadas (Figura 11C) a 20°C, 50% de umidade relativa, por período superior a 12 horas, garantindo que atingissem a umidade de equilíbrio (aproximadamente 12%) (AMARAL e TOMAZELLO FILHO, 1998).

A densidade aparente do lenho foi determinada através de um densitômetro de raios-X (QTRS-01X Tree Ring Analyzer), na direção radial das amostras (sentido medula-casca), a cada 0.04 mm (Figura 11D). A determinação dos valores de densidade gerados pelo equipamento, em tempo real (Figura 11E), é baseada na relação entre a atenuação de raios X e a densidade, expressa pela Equação 1:

$$I/I_0 = e^{-\mu_1 t} \quad (1)$$

Onde: I = intensidade do feixe de radiação após atravessar pela amostra; I₀ = intensidade do feixe de radiação sem que tenha atravessado a amostra; μ_1 = coeficiente de atenuação linear da amostra (cm⁻¹); t = espessura da amostra (cm); e = base logarítmica natural.

Para cada ponto ao longo do perfil radial, as intensidades I e I_0 são medidas enquanto μ_1 é calculado. O coeficiente linear de atenuação (μ_1) está relacionado com a densidade através da Equação 2:

$$\mu_1 = \mu_m \times \rho \quad (2)$$

Onde: μ_m = coeficiente de atenuação de massa da amostra (cm^2/g); ρ = densidade (g/cm^3)

O coeficiente de atenuação de massa (μ_m) é uma propriedade importante dada em função da energia da radiação incidente e da composição do material, o que para madeira inclui a celulose, hemicelulose, lignina, extrativos, cinzas e água. A água presente em cada um desses componentes é considerada um elemento fundamental na acurácia da determinação da densidade (QMS, 1999), justificando a necessidade do controle da umidade das amostras, certificando-se que estejam em equilíbrio com a umidade relativa da atmosfera.

Enquanto μ_m é conhecido, a densidade (ρ) pode ser calculada para cada ponto ao longo do perfil da amostra em que μ_1 foi determinada. A calibração do sistema é feita através da determinação do coeficiente de atenuação de massa do material que está sendo analisado.

Os perfis radiais de densidade aparente do lenho (Figura 11F) foram analisados com o propósito de avaliar a aplicação da técnica na identificação dos limites dos anéis de crescimento e na determinação dos valores de densidade média, máxima e mínima do lenho das árvores.

Figura 11 - Metodologia de raios-X: (A) obtenção das amostras do lenho; (B) corte das amostras em equipamento de dupla serra; (C) acondicionamento das seções transversais do lenho; (D e E) equipamento de raios X e (F) perfis de densidade aparente e respectivas amostras do lenho

4.7 Datação dos anéis de crescimento: dendrocronologia

Para a análise dos anéis de crescimento do lenho das árvores foram selecionadas 24 árvores (8 árvores de *C. pluviosa* e 16 árvores de *T. pentaphylla*), sendo 3 amostras/árvore, totalizando 72 amostras do lenho. As amostras foram coladas em suporte de madeira e tiveram o seu plano transversal polido com lixas abrasivas de granulometria crescente (80-600 grãos/mm²), seguido da aplicação de ar comprimido para a desobstrução dos vasos e evidência dos limites dos anéis de crescimento.

As amostras do lenho foram examinadas sob microscópio estereoscópico Leica modelo KL, com sistema de iluminação de fibra ótica, sendo delimitados os anéis de crescimento. Em seguida, as seções transversais do lenho foram digitalizadas em scanner HP Scanjet 3800 (resolução 1200 dpi), com uma escala. A largura dos anéis de crescimento foi determinada através do software de análise de imagem Image Pro Plus (Figura 12). Os dados de largura dos anéis de crescimento gerados foram exportados para o Microsoft Office Excel para o desenvolvimento dos cálculos e obtenção dos gráficos de variação anual da largura dos anéis de crescimento e da taxa de incremento radial das árvores.

Figura 12 – Seção transversal do lenho de árvore de *T. pentaphylla*, com os limites dos anéis de crescimento demarcados e aplicação do software *Image Pro Plus* na avaliação da sua largura

Obtida a largura dos anéis de crescimento de todas as amostras construíram-se as séries e procedeu-se a sincronização. O controle de qualidade e a verificação da sincronização foram

feitos aplicando-se o programa COFECHA (HOLMES et al., 1986). O programa realiza a remoção das tendências observadas para as séries de anéis de crescimento através do ajuste de uma curva polinomial de baixa frequência, seguido da divisão dos valores da largura dos anéis de crescimento pela curva ajustada. Assim, o sinal comum das séries é maximizado, formando uma série “master” que representa as séries individuais que a compõe (Figura 13). Como resultado, o software calcula as correlações (Pearson) entre as séries individuais em relação à série “master”. Este procedimento verifica, estatisticamente, a datação realizada, identificando as amostras ou segmentos de amostras do lenho das árvores que apresentem problemas de demarcação ou de mensuração, indicando a possível existência de anéis de crescimento falsos ou incompletos.

Foram aplicados os conceitos de Cook (1989), que considera as séries de anéis de crescimento como um agregado linear de sub-séries não observadas. Essas sub-séries incluem: a tendência da largura dos anéis de crescimento relacionada com o tamanho e a idade das árvores (A_t), o sinal climático relacionado com o ambiente (C_t), o indicador binário relacionado com a presença ($\delta=1$) ou ausência ($\delta=0$); os distúrbios causados por perturbações endógenas de ação individual ($D1_t$), os distúrbios causados por perturbações exógenas comuns a população ($D2_t$), a variabilidade ano a ano não relacionada com os demais fatores (E_t), em função do ano relacionado com cada fator (t), conforme apresentado na Equação 1:

$$R_t = A_t + C_t + \delta D1_t + \delta D2_t + E_t \quad (3)$$

Cada série cronológica de anéis de crescimento foi padronizada, retirando-se as tendências de crescimento dos dados de largura dos anéis de crescimento, assumindo que estas são funções do tamanho e da idade das árvores e das perturbações endógenas e exógenas (Eq. 4):

$$G_t = f(A_t, \delta D1_t, \delta D2_t) \quad (4)$$

Onde: G_t : tendência de crescimento estimada como uma função apenas da idade; δ : indicador binário relacionado com a presença ($\delta=1$) ou ausência ($\delta=0$); $D1_t$: distúrbios causados por perturbações endógenas e de ação localizada; $D2_t$: distúrbios causados por perturbações exógenas (população).

Com as séries de anéis de crescimento individuais das árvores corretamente datadas, procedeu-se o desenvolvimento das cronologias. Para evitar que a cronologia final dos anéis de crescimento apresente problemas envolvendo tendências relacionadas a sinais não

climáticos e outras flutuações singulares no crescimento, Cook (1989) recomenda que cada série de anéis de crescimento seja padronizada através do ajuste das mensurações originais dos anéis de crescimento. A tendência de crescimento foi estimada com o auxílio do programa ARSTAN (COOK e HOLMES et al., 1986), o qual ajusta uma função de regressão aos dados de largura dos anéis de crescimento (Eq.5).

$$G_t = b_1 \exp^{(-b_2 t)} + b_3 t + b_0 \quad (5)$$

Onde:

t: ano de formação de cada anel de crescimento; b_0 ; b_1 ; b_2 e b_3 : são os coeficientes da equação.

A remoção das tendências foi realizada conforme metodologia indicada por Fritts (1976), cujos dados são transformados em índices de largura dos anéis de crescimento (Eq.6).

$$I_t = \frac{R_t}{G_t} \quad (6)$$

Onde: I_t : índice de largura dos anéis de crescimento ou índice; R_t : série de largura dos anéis de crescimento observada; G_t : tendência de crescimento estimada como função apenas da idade.

Figura 13 – Exemplo de sincronização dos anéis de crescimento das amostras do lenho. (A) Séries cronológicas individuais e (B) Série padronizada (master) obtida com o software Cofecha

Resumidamente, a padronização tem dois objetivos (i) remover as tendências não climáticas, relacionadas com a idade das árvores e (ii) permitir que os valores padronizados de árvores individuais, com diferentes taxas anuais de crescimento, sejam calculados juntos em uma função média. Este processo de padronização tem, também, a vantagem de corrigir a heterogeneidade da variância dos dados de largura do anel de crescimento, uma vez que o desvio padrão dos índices deixa de ser função da média, como ocorria antes da padronização (MEDEIROS, 2005).

4.8 Resposta climática das árvores: dendroclimatologia

As funções de resposta são amplamente utilizadas em dendroclimatologia para descrever a relação existente entre o clima e o crescimento das árvores (FRITTS, 1976; GUIOT et al., 1982; HEIKKINEN, 1987). Para tanto, as cronologias (índices) de anéis de crescimento das árvores das 2 espécies, geradas pelo programa ARSTAN, foram comparadas com os valores mensais de temperatura média e de precipitação acumulada, através da aplicação do software RESPO (“Response Function Analysis”). O software transforma esses parâmetros climáticos em componentes principais e, em seguida, faz uma regressão onde a cronologia dos anéis de crescimento torna-se a variável dependente e os parâmetros climáticos as variáveis independentes. O resultado é uma função de resposta para cada cronologia, que expressa a relação independente entre o crescimento das árvores e o clima

Na avaliação da influência das variáveis climáticas na formação dos anéis de crescimento do lenho das árvores foram utilizados os dados meteorológicos de uma série climática de 54 anos (1957-2011), da Estação Meteorológica do Departamento de Ciências Exatas da ESALQ/USP. Os dados climáticos mensais dos últimos 20 anos, do IAC, do município de Campinas (15 km do sítio de estudo) foram comparados estatisticamente (correlação de Pearson) com os do município de Piracicaba, distantes entre si em 60 km, mostrando estão altamente correlacionados ($p < 0,01$) (Figura 14). Considerando-se os dois municípios, a temperatura média mensal histórica mostra pequena variação ao longo dos meses (18 a 24 °C). No entanto, a precipitação mensal acumulada caracteriza-se por uma grande variação (250 mm em dezembro-janeiro, 20 mm em julho-agosto). Desta forma, observa-se a presença de uma estação climática chuvosa/temperatura elevada (outubro-março) e outra seca/temperatura amena (abril-setembro), sendo a última a principal indutora da diminuição da atividade cambial e, conseqüentemente, formação dos anéis de crescimento no lenho.

Figura 14 – Dados climáticos mensais das Estações Meteorológicas de Campinas e Piracicaba para os últimos 20 anos. (A) Temperatura média e (B) Precipitação acumulada

4.9 Incremento radial do tronco das árvores

Com a sincronização dos valores de largura dos anéis de crescimento anuais das árvores, foi realizado o estudo do crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*, para os 3 sítios do estudo, em função da idade, determinando-se do incremento acumulado (IA) e o incremento radial médio anual (IMA).

O IA do tronco é determinado pela soma dos valores de largura dos anéis de crescimento consecutivos de cada série, considerando o primeiro ano de cada.

O cálculo do IMA foi realizado através da aplicação da Equação 7:

$$IMA = \frac{Raio_t}{n} \quad (7)$$

Onde: IMA: incremento médio anual; $Raio_t$: comprimento do raio (mm) no ano t; n: número de anéis de crescimento no raio; t: ano.

Para a comparação do crescimento radial entre as árvores da mesma espécie pertencentes a sítios diferentes, os valores de IA e IMA foram calculados para o período comum entre as séries cronológicas obtidas.

4.10 Análise química dos anéis de crescimento do lenho das árvores

4.10.1 Medidas das intensidades das linhas de emissão por LIBS

As baguetas coletadas para a análise química foram secas em condições naturais, fixadas com fita dupla face em suporte de madeira específico e levadas ao micrótomo de deslizamento WLS (deslocamento de 40 cm) para o polimento da seção transversal, para que os limites dos anéis de crescimento pudessem ser estabelecidos. Para tanto, utilizou-se de um conjunto de navalhas de aço descartáveis, descontaminadas com ácido nítrico 10% (HNO_3 10%) e mergulhada em água destilada e deionizada, no início de preparo de cada amostra. Na sequência, as amostras foram analisadas conforme os procedimentos descritos no item 4.7 para a estimativa da idade das árvores e determinação dos pontos (anéis) de avaliação.

Os experimentos com LIBS foram conduzidos em parceria com o grupo de pesquisa em espectrometria atômica, do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA), da Universidade de São Paulo.

Para o desenvolvimento das análises foi utilizado um laser Q-Switched Nd:YAG (Brilliant, Quantel) operando no comprimento de onda fundamental (1064 nm), com taxa de repetição de 10 Hz e espectrômetro modelo ESA3000 (LLA Instruments), sistema óptico com montagem Echelle e detector ICCD. Este espectrômetro permite a aquisição de sinais do espectro de emissão na região entre 200 e 780 nm, com poder de resolução entre 10000 e 20000. A emissão do plasma foi focalizada na entrada da fibra óptica (1,5m; 600 μm) do espectrômetro utilizando um telescópio composto de lentes de sílica fundida de 50 e 80 mm (Figura 15).

As condições de operação foram de 100 pulsos por ponto, 100 mJ por pulso, 17,5 cm de distância entre a lente de focalização do laser e a amostra, 2500 de amplificação, 2 μs de atraso e 5 μs de integração, em atmosfera de argônio e com o sistema óptico de coleta da radiação emitida pelo plasma posicionado a 25° em relação ao eixo de focalização do laser. A energia dos pulsos do laser foi monitorada com um detector de energia equipado com sensor piroelétrico, modelo FieldMax II-P Coherent.

As amostras radiais do lenho das árvores foram fixadas em um porta amostra, na unidade de ablação, com translação manual em 2 eixos. Foram selecionados 12 anéis de crescimento por amostras, distribuídos nas porções inicial, intermediária e final da amostra (sentido medula-casca), conforme esquema apresentado na Figura 16, sendo que a distância entre as porções variou de acordo com a idade (número de anéis) e o comprimento de cada

amostra. Para cada anel de crescimento selecionado, foram avaliados 3 pontos ao longo da largura da amostra, totalizando 36 pontos por amostra.

Figura 15 – (A) Arranjo geral do experimento com LIBS; (B) Vista frontal do sistema óptico (lente de focalização do laser e telescópio) e porta amostra

Os sinais de emissão dos elementos químicos (Figura 17) foram identificados através do software ESAWIN (LLA Instruments GmbH) e são apresentados na Tabela 5.

Os valores de intensidade de emissão e área de pico obtidos foram corrigidos através da subtração dos sinais médios de emissão das regiões espectrais independentes (BG) localizadas nas proximidades (anterior e posterior) das linhas de emissão dos analitos, aplicando-se o software MATLAB 7, conforme metodologia utilizada por Nunes (2010) e Carvalho (2011).

Após o tratamento dos dados, para os elementos que apresentaram mais de uma linha de emissão, selecionou-se apenas a considerada mais sensível (maiores valores de intensidade e área de pico), com o intuito de facilitar a comparação dos resultados entre os sítios e as espécies.

Cabe ressaltar que cada valor obtido nesta etapa refere-se aos espectros acumulados dos 3 pontos avaliados em cada anel de crescimento, incidindo-se 100 pulsos consecutivos/ponto.

Figura 16 - Ilustração dos pontos selecionados para determinação elementar via LIBS

Figura 17 – Exemplo de espectro de emissão de uma amostra de *C. pluviosa*, do sítio urbano, obtido com 100 pulsos

Tabela 5 – Elementos e linhas de emissão selecionadas para as análises por LIBS

Elemento e Linha(s) de emissão (nm)											
Al	B	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
						277.670					
308.216	249.677	315.887	324.755	259.942	404.414	277.983	257.610	588.995	213.618	251.611	206.200
309.271	249.773	442.544		275.573		280.271		589.593	214.914	288.161	213.855
						285.213					

4.10.2 Determinação da concentração total de elementos químicos por ICP OES

A aplicação da técnica de espectrometria de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente (ICP OES) visou a determinação da concentração total de macro e micro nutrientes e de elementos potencialmente tóxicos no lenho das árvores.

Amostras do lenho de 3 árvores/espécie/sítio, previamente analisadas por LIBS, foram cominuídas com auxílio de uma micro-retífica Dremell, modelo 4000. Em seguida, foram digeridas em triplicada em forno de micro-ondas modelo ETHOS 1600, transferindo-se 250 mg de cada amostra para frascos de digestão e adicionando-se 6,0 ml de HNO₃ 20% v/v e 2,0 ml de H₂O₂ 30% m/m em frasco de TFM[®]. As amostras foram devidamente acomodadas em um rotor e levadas ao forno de micro-ondas, aplicando-se o programa de digestão da Tabela 6.

Passado o período de resfriamento, as soluções das amostras digeridas foram transferidas para tubos do tipo Falcon, completando-se o volume para 25 ml com água purificada em sistema Milli-Q. Estes mesmos procedimentos foram aplicados para o material certificado NIST 1575a - *Trace Elements in Pine Needles* (Anexo A).

Os digeridos foram analisados com ICP OES, em condições robustas de análise (SILVA et al., 2002), com equipamento da marca Thermo Scientific (iCAP 6000 series) que possui visão axial e radial e nebulizador de fluxo cruzado, do Departamento de Química, da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).

As seguintes linhas de emissão foram selecionadas: (i) Al 167,079 nm, (ii) B 249,678 nm, Ca 431,825, (iv) Cd 226,502, (v) Co 228,616, (vi) Cr 267,716, (vii) Cu 327,396, (viii) Fe 259,940, (ix) K 691,107, (x) Mg 279,553, (xi) Mn 257,610, (xii) Na 588,995, (xiii) Ni 231,604, (xiv) P 177,495, (xv) Pb 220,353, (xvi) Si 212,412 e (xvii) Zn 213,856. Como critério de seleção entre as distintas linhas de um mesmo analito, consideraram-se os resultados gerados pela análise dos padrões (curvas de calibração), a ocorrência de saturação do detector do espectrômetro e a maior sensibilidade observada.

Tabela 6 - Programa utilizado para digestão das amostras do lenho em fornos micro-ondas

Etapa	Tempo (min)	Temperatura (°C)	Potência (W)
1	20	140	1000
2	20	140	800
3	10	resfriamento	

4.11 Análises estatísticas

Na análise estatística dos resultados foram aplicados os programas IBM SPSS Statistics, (versão 20), e MATLAB (versão 7.01.). Para os parâmetros incremento radial acumulado, incremento médio anual, densidade aparente (média, máxima e mínima), valores totais da concentração dos elementos químicos (ICP OES) e intensidade de emissão dos elementos químicos nas amostras do lenho (LIBS), os resultados entre as árvores dos sítios foram comparados através da análise de variância (ANOVA) e, quando necessário, aplicado o teste de comparação de média (Tukey), ajustado a 95% de probabilidade.

A correlação entre as intensidades de emissão obtidas pela análise dos anéis de crescimento do lenho das árvores dos diferentes sítios, para cada espécie, foi estudada por meio da análise de componentes principais (PCA; JOHNSON e WICHERN, 1992), centralizando os dados na média, na verificação de possíveis agrupamentos de amostras e elementos de acordo com a variação dos espectros de emissão.

A análise de correlação (Pearson – 1 e 5% de significância) foi utilizada para verificar o grau de relacionamento entre as intensidades de emissão dos 12 elementos químicos de interesse e também a idade e a largura do anel de crescimento do lenho das árvores, considerando espécies e sítios separadamente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características dendrométricas e visuais das árvores selecionadas

Os valores médios e individuais do DAP do tronco das árvores são apresentados na Tabela 7 (Anexo B1). O DAP médio das árvores de *C. pluviosa* e de *T. pentaphylla* foi de 37,91 e 38,65 cm, respectivamente. Apesar do valor médio similar, cada espécie possui uma distribuição diamétrica distinta, com destaque para as árvores de *C. pluviosa*, com variação de 23,24-67,48 cm. Ainda, entre as árvores da mesma espécie existem variações na altura do fuste e no diâmetro de copa, indicando que foram plantadas em diferentes períodos (anos). A idade das árvores foi determinada pela contagem dos anéis de crescimento, aplicando-se as técnicas de dendrocronologia.

Houve diferença significativa nos valores do DAP médio das árvores das 2 espécies do sítio urbano em relação às do periurbano e rural, com maior valor no sítio urbano, seguido do periurbano e do rural. As árvores das 2 espécies apresentam características normais de ramificação e retidão do tronco, não sendo observados sintomas de infestação e infecção por insetos e fungos, e de parasitismo por outras espécies vegetais. No entanto, foram verificados indícios de poda de condução e/ou manutenção em algumas árvores e da interferência de estruturas urbanas no crescimento das árvores, como a proximidade das ruas e passeio pavimentado, com redução da área livre, solo compactado e parcialmente impermeabilizado, competição com espécies herbáceas e contato da copa das árvores com a fiação elétrica e com veículos pesados.

Tabela 7 – Valores médios, máximos e mínimos do DAP do tronco das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* e

Espécie	Sítio	DAP (cm)				
		Médio	Máximo	Mínimo	Desvio padrão	C.V (%)
<i>Caesalpinia pluviosa</i>	Urbano	48,9 b	67,5	36,3	11,6	23,7
	Periurbano	33,1 a	47,1	26,7	6,5	19,5
	Rural	31,8 a	50,3	23,2	10,7	33,6
	Média	37,9	55,0	28,8	9,6	25,6
<i>Tabebuia pentaphylla</i>	Urbano	44,4 b	53,5	32,8	6,0	13,4
	Periurbano	36,3 a	46,8	25,8	7,2	19,8
	Rural	35,2 a	40,4	31,5	3,8	10,8
	Média	38,7	46,9	30,0	5,6	14,7

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

5.2 Análise da fertilidade do solo

Os resultados dos parâmetros de fertilidade e dos teores fitodisponíveis de macro e micronutrientes e de elementos químicos potencialmente tóxicos nos solos amostrados são apresentados nas Tabelas 8 e 9. Os valores obtidos indicam, principalmente, variações importantes nos teores dos elementos químicos entre os sítios e mesmo entre grupos de amostras coletadas dentro do mesmo sítio. Em geral, os solos dos 3 sítios possuem acidez alta com exceção das amostras dos sítios urbano e rural de *C. pluviosa*, classificados como de média acidez. Os maiores teores de matéria orgânica (M.O) foram encontrados nos solos localizados nos sítios urbano (*C. pluviosa*; Paulínia) e rural (*T. pentaphylla*; Piracicaba).

Os resultados dos parâmetros fertilidade do solo, que consideram a soma dos cátions permutáveis $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^{+}$ (soma de bases trocáveis - SB) + $\text{H}^{+} + \text{Al}^{3+}$ (capacidade de troca catiônica - CTC), podem ser resumidos através dos valores de saturação por bases (V%), calculado em função dos dois primeiros parâmetros. Para V%, observaram-se os maiores valores para os sítios rural (*T. pentaphylla*, Piracicaba e *C. pluviosa*, Paulínia, respectivamente), seguido do sítio urbano (*C. pluviosa*). Por possuírem valores acima de 50%, estes 3 solos podem ser classificados como eutróficos (férteis), enquanto os demais (*T. pentaphylla*, sítio urbano e *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*, sítio periurbano) como distróficos (pouco férteis) (RONQUIM, 2010).

Para o fósforo (P), foram detectados valores muito elevados no solo coletado próximo às árvores de *C. pluviosa* e de *T. pentaphylla* (1368 e 176 mg/dm³, respectivamente) no sítio urbano. Também no Distrito de Betel, valores acima de 750 mg/dm³ de P foram encontrados por Chagas (2009) em solo coletado no entorno de empresa de reciclagem de Hg, resultado da suspensão de poeira fosforosa que reveste lâmpadas fluorescentes (4-6 g/lâmpada), sua principal matéria-prima.

Em relação aos micronutrientes, o teor mais elevado de boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), níquel (Ni) e zinco (Zn) foi verificado nas amostras de solo próximas às árvores de *C. pluviosa* do sítio urbano e de manganês (Mn) no sítio rural próximo às árvores de *T. pentaphylla*. Os maiores valores de concentração de alumínio (Al) foram encontrados nas amostras de solo dos sítios urbano e periurbano de *T. pentaphylla*, respectivamente, não sendo detectados para as demais localidades (<0,1 mg/dm³). O cádmio (Cd) foi detectado somente no solo do sítio urbano referente às árvores de *C. pluviosa*. Os resultados dos teores de cromo (Cr) ficaram abaixo de <0,1 mg/dm³ para todas as amostras de solo. Ainda, os resultados

indicaram não haver diferenças importantes na disponibilidade de chumbo (Pb) no solo dos 3 sítios, nas árvores das 2 espécies.

Tabela 8 – Teores fitodisponíveis de macronutrientes e parâmetros de fertilidade no solo dos sítios do estudo

Espécie	Sítio	Amostra	P	Ca	K	Mg	S.B.
			mg/dm ³	mmolc/dm ³	mmolc/dm ³	mmolc/dm ³	mmolc/dm ³
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	1	1368,00	41,00	4,30	15,00	60,30
<i>T. pentaphylla</i>		2	176,00	34,00	3,30	3,00	40,30
		Média	772,00	37,50	3,80	9,00	50,30
<i>C. pluviosa</i>	Periurbano	1	3,00	13,00	0,90	3,00	16,90
		2	5,00	15,00	8,20	6,00	29,20
<i>T. pentaphylla</i>		3	5,00	16,00	3,70	6,00	25,70
		4	3,00	11,00	1,50	4,00	16,50
		Média	4,00	13,75	3,58	4,75	22,08
<i>C. pluviosa</i>	Rural	1	12,00	39,00	3,10	16,00	58,10
<i>T. pentaphylla</i>		2	14,00	76,00	3,50	24,00	103,50
		Média	13,00	57,50	3,30	20,00	80,80
Espécie	Sítio	Amostra	H+Al	C.T.C.	V%	M.O.	pH
			mmolc/dm ³	mmolc/dm ³	%	g/dm ³	-
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	1	34,00	94,30	64,00	52,00	5,10
<i>T. pentaphylla</i>		2	64,00	104,30	39,00	18,00	5,00
		Média	49,00	99,30	51,50	35,00	5,05
<i>C. pluviosa</i>	Periurbano	1	28,00	44,90	38,00	18,00	4,40
		2	47,00	76,20	38,00	29,00	4,40
<i>T. pentaphylla</i>		3	31,00	56,70	45,00	20,00	4,50
		4	38,00	54,50	30,00	20,00	4,30
		Média	36,00	58,08	37,75	21,75	4,40
<i>C. pluviosa</i>	Rural	1	25,00	83,10	70,00	26,00	5,10
<i>T. pentaphylla</i>		2	22,00	125,50	82,00	41,00	4,30
		Média	23,50	104,30	76,00	33,50	4,70

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

Tabela 9 – Teores fitodisponíveis de micronutrientes e de elementos químicos potencialmente tóxicos no solo dos sítios do estudo

Espécie	Sítio	Amostra	B	Cu	Fe	Mn	Ni
			mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	1	1,97	23,50	116,00	13,80	0,97
<i>T. pentaphylla</i>		2	4,46	4,90	20,00	8,60	0,27
		Média	3,22	14,20	68,00	11,20	0,62
<i>C. pluviosa</i>	Periurbano	1	0,23	0,70	92,00	4,50	0,15
		2	0,28	0,90	44,00	10,10	0,09
<i>T. pentaphylla</i>		3	0,21	1,10	82,00	18,20	0,37
		4	0,27	1,10	80,00	4,30	0,15
		Média	0,25	0,95	74,50	9,28	0,19
<i>C. pluviosa</i>	Rural	1	0,20	1,60	67,00	9,70	0,32
<i>T. pentaphylla</i>		2	0,24	4,90	61,00	54,60	0,33
		Média	0,22	3,25	64,00	32,15	0,33

Espécie	Sítio	Amostra	Zn	Al	Cd	Cr	Pb
			mg/dm ³	mmolc/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	1	74,80	< 0,1	0,44	< 0,1	2,87
<i>T. pentaphylla</i>		2	15,80	7,00	< 0,1	< 0,1	0,88
		Média	45,30	3,50	0,22	< 0,1	1,88
<i>C. pluviosa</i>	Periurbano	1	0,80	4,00	< 0,1	< 0,1	0,91
		2	0,80	5,00	< 0,1	< 0,1	1,99
<i>T. pentaphylla</i>		3	1,40	3,00	< 0,1	< 0,1	2,42
		4	6,00	7,00	< 0,1	< 0,1	1,89
		Média	2,25	4,75	< 0,1	< 0,1	1,80
<i>C. pluviosa</i>	Rural	1	1,90	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,58
<i>T. pentaphylla</i>		2	3,40	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,41
		Média	2,65	< 0,1	< 0,1	< 0,1	2,00

5.3 Caracterização anatômica macro e microscópica do lenho das árvores

A madeira das árvores de *Caesalpinia pluviosa* (Figura 18) é de densidade muito pesada, cor marrom, grã-direita, textura média e cheiro imperceptível. Apresenta cerne castanho escuro e alburno branco-amarelado, claramente distintos. *Camadas de crescimento* demarcadas por zona fibrosa de tecido mais escuro e por finas linhas de parênquima marginal. *Parênquima axial* paratraqueal confluyente, visível a olho nu, em geral formando confluências curtas e linhas marginais finas, composto por 5 (7) 8 células por série. *Vasos* dispostos em porosidade difusa, exclusivamente solitários (90% ou mais; Figura 18AB). *Placas de perfuração* simples. *Pontoações intervasculares* alternas pequenas, com 5,1 μm de diâmetro, e *pontoações radiovasculares* com aréolas distintas, semelhantes às intervasculares em tamanho e forma por todo o raio. *Elementos de vaso* com 100 (122) 200 μm de diâmetro de lume e ≤ 350 (200) μm de comprimento. Presença de 5 (11) 20 vasos/ mm^2 . *Tilose* comumente presente. *Fibras* simples e diminutamente areoladas, não septadas, com paredes finas a espessas, e medindo 900 (1238) 1600 μm de comprimento. *Raios* visíveis na face transversal somente sob lente de 10x no plano transversal, com 1 (2) 3 células de largura, compostos somente por células procumbentes (FIGURA 18D). Presença de 4 (11) 12 raios/mm (17C). *Estrutura estratificada* presente em todos os raios. *Inclusões minerais* observados na forma de cristais prismáticos em células subdivididas do parênquima axial (em câmaras).

O único trabalho que descreve as características anatômica microscópicas de *C. pluviosa* encontrado na literatura foi realizado por Schidt, 1915 apud Gasson et al. (2009). Neste estudo, foram encontrados valores inferiores para os parâmetros número de vasos por mm^2 (2-4) e de células que compõe o parênquima axial (2-4) e superiores para número de raios por mm (15-22). A anatomia de *Caesalpinia pluviosa*. var. *paraensis* também foi apresentada por Gasson e colaboradores, com descrição semelhante as árvores de *Caesalpinia pluviosa*. var. *peltophoroides* analisadas, exceto no parâmetro diâmetro de lume dos elementos de vaso (50-100).

Embora sejam poucos os trabalhos em anatomia da madeira de *C. pluviosa*, estudos que apresentam as similaridades e diferenças entre outras espécies do gênero *Caesalpinia*, representada por 140 espécies, de ocorrência natural no Brasil e em outros países da América Latina são mais comuns (ROIG et al. 2005; De PERNÍA e MELANDRI, 2006; LISI et al., 2008; SILVA et al., 2009; GASSON et al., 2009).

Figura 18 – Aspectos anatômicos macro (A) e microscópicos (B-D) do lenho das árvores de *Caesalpinia pluviosa*. A: Plano transversal (escala= 250 µm); B até D: Planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial, respectivamente (escala= 500 µm). Setas indicam o limite dos anéis de crescimento

As árvores de *Tabebuia pentaphylla* apresentam madeira de densidade média, de coloração marrom-acastanhado, grã direita, textura fina, cheiro imperceptível e cerne e alburno indistintos. *Camadas de crescimento* distintas, demarcadas por zona fibrosa de tecido mais escuro e por finas linhas de parênquima marginal (Figura 19A). *Parênquima axial* paratraqueal confluyente, pouco nítido, visível sob lente de 10x, formando confluências curtas e longas, linhas marginais muito finas e composto por 5 (6) 8 células por série. *Vasos* dispostos em porosidade difusa, pouco visível a olho nu, pequenos, numerosos, arrançados em faixas tangenciais, exclusivamente solitários (90% ou mais), com contorno angular (Figura 19AB). *Placas de perfuração* simples. *Pontoações intervasculares* alternas diminutas, com 3,1 µm de diâmetro e *pontoações radiovasculares* com aréolas distintas, semelhantes às intervasculares em tamanho e forma por todo o raio. *Elementos de vaso* com 50 (94) 100 µm de diâmetro de lume e ≤ 350 (252) µm de comprimento. Presença de 5 (8) 20 vasos/mm². *Fibras* simples e diminutamente areoladas, não septadas, com paredes finas a espessas, e medindo 900 (995) 1600 µm de comprimento. *Raios* pouco nítidos na face transversal, visíveis sob lente de 10x, com 1 (2) 3 células de largura, compostos somente por células

procumbentes (Figura 19D). Presença de ≥ 12 raios/mm (Figura 19C). *Estrutura estratificada* presente em todos os raios.

Assim como ocorre com *C. pluviosa*, são poucos os trabalhos que tratam especificamente da descrição anatômica de *T. pentaphylla*. Detalhes da anatomia da madeira só aparecem em estudos que avaliam a aplicação dessa (WORBES, 2002; CHAGAS, 2009) e de outras (VETTER e BOTOSSO, 1989ab; MATTOS, 1999; CALLADO et al., 2001; MARIA, 2002; LISI et al., 2008; FONSECA-JÚNIOR et al., 2009) espécies do gênero em estudos dendrocronológicos, na caracterização dos anéis de crescimento. Neste sentido, para a maioria das espécies, o limite entre as camadas de crescimento é definido por finas linhas de parênquima marginal, facilmente distinguíveis (principalmente na região do alburno), por zonas fibrosas escuras de fibras de paredes espessas e, mais raro, pela ausência de vasos.

Figura 19 – Aspectos anatômicos macro (A) e microscópicos (B-D) do lenho das árvores de *Tabebuia pentaphylla*. A: Plano transversal (escala= 250 μ m); B até D: Planos transversal, longitudinal tangencial e longitudinal radial, respectivamente (escala= 500 μ m). Setas indicam o limite dos anéis de crescimento

5.4 Densidade aparente do lenho das árvores

Os valores médios de densidade aparente média, máxima e mínima e do raio (comprimento) das amostras do lenho de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* são apresentados na Tabela 10 (cada árvore, Anexo D). Entre os grupos de árvores das 2 espécies, observaram-se diferenças significativas para os valores de densidade aparente média, máxima e mínima do lenho, sempre superiores para as da espécie *C. pluviosa*. Os valores mínimo e máximo do raio (comprimento) das amostras do lenho indicam que as árvores avaliadas possuem diâmetros do tronco, com variações de mais de 100% e idades diferentes (item 5.5). Essa constatação é importante na análise dos resultados, uma vez que a literatura reporta a influência da idade na densidade do lenho, relacionada com as variações da estrutura anatômica e composição química, no sentido radial, como por exemplo o aumento da espessura da parede celular, diminuição da largura das células, deposição de extrativos, etc. (VITAL et al., 1984).

Para as árvores das 2 espécies não foram observadas variações importantes nos valores médios de densidade aparente média, máxima e mínima do lenho, com o aumento do raio (comprimento) das amostras. De maneira geral, observaram-se tendências mais ou menos constantes para as densidades média e mínima do lenho e de ligeiro aumento para a densidade máxima do lenho, especialmente nas árvores de *T. pentaphylla* (Figura 20; Anexo D). O valor da densidade aparente média das árvores de *C. pluviosa* foi de 1,03 g/cm³, que, embora alto, fica próximo aos apresentados por Paula e Alves (2007) e Bortoluzzi et al. (2008), de 0,98 g/cm³ e REMADE (2012), de 1,05 g/cm³.

Para as árvores de *T. pentaphylla*, a densidade aparente média do lenho foi de 0,65 g/cm³, sendo que Chagas (2009), utilizando-se a mesma técnica, porém, com outro equipamento e tipo de análise, obteve valor de densidade do lenho pouco inferior, de 0,60 g/cm³.

No geral, os valores de densidade aparente do lenho obtidos ficam acima do referencial para as 2 espécies, com a literatura nacional e internacional apresentando, com maior frequência, os valores de densidade básica (massa seca/volume saturado), sempre inferiores aos da densidade aparente (massa/volume, a um mesmo teor de umidade, próximo a 12%) (ABNT, 1997).

Tabela 10 - Valores de densidade média, máxima e mínima (entre parênteses), parâmetros estatísticos (desvio padrão e coeficiente de variação) e comprimento (raio) das amostras do lenho de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*

Espécie	Densidade (g/cm ³)				C.V. (%)	Raio (cm)
	Média	Máxima	Mínima	Desvpad		
<i>Caesalpinia pluviosa</i>	1,03 b (0,94-1,09)	1,38 b (1,25-1,50)	0,59 b (0,52-0,67)	0,12	11,69	16,12
<i>Tabebuia pentaphylla</i>	0,65 a (0,59-0,69)	1,01 a (0,92-1,16)	0,39 a (0,34-0,45)	0,09	14,42	15,98

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

Figura 20 – Relação entre os valores médios de densidade aparente (média, máxima e mínima) e o raio das amostras do lenho de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*

Os perfis radiais de densidade aparente do lenho das árvores das 2 espécies (Figuras 21 e 21; Anexos D1-4) indicam uma relação com a sua estrutura anatômica do lenho, em função da leitura a intervalos de 40 μ m (vide item 4.6). A avaliação detalhada dos perfis de variação radial da densidade do lenho das árvores das 2 espécies permite as seguintes inferências:

Nas árvores de *C. pluviosa* os padrões de variação de densidade do lenho observados foram (i) aumento gradativo da densidade até aproximadamente 50% do comprimento da amostra, seguido de estabilização (50-75%) e decréscimo até a porção final (amostras 2, 3, 4, 5, 6 e 8) e (ii) aumento gradativo da densidade a partir da medula até a casca (amostras 1 e 7) (Anexos D1, 2). A definição dos padrões de variação da densidade é importante pela influência exercida pelas características anatômicas e químicas e, desta forma, inerentes às regiões do lenho das árvores. Neste sentido, observa-se nas amostras do lenho das árvores do padrão (i) a separação das regiões do cerne e do alburno do lenho, caracterizadas pelo maior e

menor valor da densidade e pela coloração mais escura e mais clara, respectivamente (Figura 21). O processo de cernificação do tronco das árvores é caracterizado pela deposição de extrativos na sua região interna – alburno – transformando-a em cerne (região composta por células não funcionais, com função de suporte mecânico); este processo ocorre de forma contínua ao longo da vida das árvores, conferindo um aumento dos valores de densidade do lenho. Segundo Silva e Trugilho (2003), o aumento da densidade do lenho ocorre em função da deposição dos extrativos, formação de tiloses obliterando o lume dos vasos, a depleção das moléculas de amido, pelo consumo de O_2 e liberação de CO_2 e consequente morte das células do parênquima radial. Burger e Richter (1991) afirmam que a lignina exerce, também, importante papel, de peso molecular mais elevado no cerne, tornando a madeira do cerne menos permeável, dimensionalmente mais estável e mais densa (USDA, 1999). Dessa forma, as árvores mais velhas de uma mesma espécie, crescendo em condições ambientes semelhantes, possuem uma maior relação cerne/alburno e maiores valores de densidade aparente média, quando comparadas com as mais jovens.

Além disso, os padrões de variação radial da densidade do lenho (i) e (ii) permitem a caracterização das regiões do lenho de madeira juvenil e adulta, sendo a primeira delimitada pela camada interna no tronco, resultado do crescimento em diâmetro nos anos iniciais e, a segunda, a camada mais externa do tronco, formada pela atividade do câmbio fisiologicamente maduro. Segundo Jankowsky (1979), a madeira juvenil corresponde ao xilema secundário produzido durante a fase inicial da vida da árvore, caracterizando-se a madeira adulta, na sequência, pelo progressivo aumento nas dimensões e mudanças correspondentes na forma, estrutura e disposição das células nas sucessivas camadas de crescimento. Ainda, segundo o autor, a proporção de madeira juvenil, tanto em peso como em volume, diminui com o aumento em idade, sendo difícil determinar o período de juvenilidade da árvore, que para algumas espécies do gênero *Eucalyptus* pode ser superior a 15 anos.

A madeira juvenil, em relação à madeira adulta possui menor densidade básica e resistência mecânica, menor comprimento das fibras e vasos, maior diâmetro celular, paredes celulares mais finas, maiores ângulos microfibrilares na camada S_2 e maiores teores de lignina e hemicelulose e menor de celulose (KOGA, 1988). Jamal Filho (2011), afirma que a delimitação entre as regiões de madeira juvenil e madeira adulta é realizada, normalmente, com a análise do comprimento das fibras (ou das traqueídes), no sentido medula-casca e, alternativamente, através da determinação da variação da densidade aparente da madeira. Dessa forma, observam-se (Figura 21) a madeira juvenil (caracterizada pelo aumento

gradativo dos valores de densidade, até 60% do comprimento) e a adulta (com valores de densidade estáveis até 70%, decrescendo suavemente, na sobreposição a região do alburno, até 100% do raio).

A aplicação da densitometria de raios-X possibilitou a demarcação do limite dos anéis de crescimento no lenho das árvores de *C. pluviosa* (Figura 21) pelas variações de densidade inter e intra-anéis de crescimento e como resultado da estrutura e organização dos elementos anatômicos do lenho. A queda do valor da densidade do lenho, na transição entre as camadas de crescimento, deve-se à formação do tecido do parênquima longitudinal marginal, constituído por células de parede delgada e maior lume, exercendo menor atenuação à passagem dos raios-X, durante a irradiação do lenho. No entanto, a demarcação do limite dos anéis de crescimento no alburno, sobretudo, faz-se necessário o exame da estrutura anatômica do lenho com a sobreposição do perfil radial de densidade e da seção transversal da amostra do lenho (Figura 18). As características anatômicas do lenho de *C. pluviosa*, de porosidade difusa, aliado a precisão na determinação dos pontos de densidade (a cada 40 μm) geram perfis característicos.

As árvores de *T. pentaphylla* apresentaram apenas um padrão de variação radial caracterizado pelo aumento sutil da densidade aparente do lenho (Amostras 1-8; Anexos D3-4). A ausência de distinção das regiões do cerne-alburno nas árvores de *T. pentaphylla*, indicada na descrição macroscópica do lenho (vide item 5.3), é corroborada através do perfil radial de densidade obtido por densitometria de raios-X. Da mesma forma, o perfil de densidade não permite a identificação das regiões de madeira juvenil-adulta, o que indica a necessidade da aplicação de parâmetros da anatomia da madeira – como a avaliação do comprimento das fibras. Por outro lado, permitiu a demarcação dos limites dos anéis de crescimento em resposta às características anatômicas do lenho, bem definidas e que demarcam a transição entre as camadas de crescimento do lenho. O aumento do valor de densidade do lenho, próximo ao limite do anel de crescimento é resultado das camadas de células de fibras de parede espessa e com achatamento radial e pela redução da frequência e do diâmetro dos vasos, seguida por uma queda abrupta associada ao parênquima marginal (Figura 22).

Figura 21 – Perfil radial da densidade aparente do lenho de *C. pluviosa*, indicando a delimitação das regiões cerne, albarno, madeira juvenil e adulta e limite dos anéis de crescimento (setas)

Figura 22 – Perfil radial da densidade aparente do lenho de *T. pentaphylla*. Setas indicam o limite dos anéis de crescimento

5.5 Dendrocronologia das espécies do estudo

A análise da estrutura anatômica e dos perfis radiais de densidade do lenho indica que os anéis de crescimento são, de modo geral, mais largos e menos distintos na região interna do lenho, próxima da medula, pelas características da madeira juvenil, formada nos primeiros anos de crescimento do tronco das árvores das 2 espécies. Nesta região, a largura dos anéis de crescimento é, muitas vezes, superior a 10 mm e caracterizados pela pouca distinção entre as regiões do lenho inicial/tardio. No xilema formado após os 10-15 anos, os anéis de crescimento são mais característicos e perceptíveis a olho nu observando-se uma redução gradativa da sua largura até a casca, relacionada ao aumento da idade das plantas.

Os resultados do controle de qualidade e datação cruzada dos anéis de crescimento das amostras do lenho das árvores de *C. pluviosa* e de *T. pentaphylla*, nos 3 sítios de estudo, obtidos pela aplicação do software COFECHA, são apresentados na Tabela 11. Observa-se uma redução do número de amostras e de árvores na composição das séries cronológicas de cada sítio e espécie em relação ao número coletado (vide item 5.1), como resultado dos distintos padrões de crescimento encontrados para algumas das árvores estudadas. Sua exclusão das análises deve-se a obtenção de um ajuste pequeno, garantindo que a sincronização final atingisse o valor do nível crítico de significância (Pearson-99%). Na construção das séries cronológicas foram utilizadas 46 árvores, sendo 19 de *C. pluviosa* e de 27 de *T. pentaphylla* evidenciando que respondem à presença de um sinal comum determinando o ritmo de crescimento radial.

O valor de intercorrelação, significativos para as árvores das 2 espécies dos 3 sítios, variou de 0,517 e 0,614, não sendo observada relação entre esses valores e a qualidade dos sítio de estudo, na comparação dos resultados das 2 espécies. A sensibilidade média variou de 0,346 e 0,562, apresentando uma relação positiva com a longitude das séries (número de anos), medida que indica a mudança relativa na largura do anel de crescimento de 1 ano para o próximo e que varia dependendo da espécie e região climática (NOOA, 2012). Segundo Fritts (1976), os valores de sensibilidade média estão diretamente correlacionados à suscetibilidade ao estresse climático, sendo menores em árvores mais complacentes. Nesse contexto, os maiores valores de sensibilidade média foram encontrados nas árvores do sítio urbano, considerando-se as 2 espécies.

A longitude das séries variou em função da própria idade das árvores e, também, devido à profundidade de inserção da sonda no tronco das árvores durante a coleta e do descarte da região do lenho próxima da medula em algumas amostras, pelas irregularidades e/ou

dificuldades na identificação de alguns anéis de crescimento. Nas árvores das 2 espécies com amostras completas do lenho (presença de casca e de medula) foram contados o número máximo de 54 e 52 anéis de crescimento para as árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*, respectivamente, no sítio urbano, seguido pelos sítios rural (44 e 34 anéis de crescimento) e periurbano (27 e 24 anéis de crescimento). A datação cruzada das séries de anéis de crescimento possibilitou a identificação de anéis de crescimento falsos e ausentes, presentes nas amostras do lenho das árvores das duas espécies (Figura 23A-D), principalmente nas localizadas no sítio urbano. Nestes casos, as séries de anéis de crescimento foram novamente medidas, sincronizadas e datadas.

No lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* os falsos anéis de crescimento apresentam características anatômicas similares às dos anéis de crescimento verdadeiros embora, muitas vezes, com valor muito reduzido de largura (limite muito próximo ao dos anéis de crescimento verdadeiros) e ausência de formação de lenho tardio (fibras com parede mais espessa e vasos de diâmetro reduzido) próximo ao limite do anel de crescimento. Os anéis de crescimento incompletos são, no entanto, caracterizados pela ausência de um ou mais parâmetros anatômicos (zona fibrosa, diâmetro tangencial e na frequência de vasos e parênquima marginal) que caracterizam um anel de crescimento verdadeiro.

A formação dos anéis de crescimento falsos ou incompletos no lenho das árvores é amplamente discutida na literatura, embora alguns aspectos do processo ainda sejam indefinidos. De maneira geral, os fatores diversos que contribuem com a sua formação constituem-se em uma fonte comum de erros em pesquisas com dendrocronologia (FRITTS, 1976). As árvores de *Larix sibirica* na Mongólia, de *Tectona grandis* na Índia e de *Picea abies* na França formaram anéis de crescimento falsos, quando submetidas ao estresse hídrico entre estações secas de anos consecutivos (PRIYA e BHAT, 1998; TRETER et al., 2002; BOURIAUD et al., 2005). Outras formas de estresse como elevados níveis de poluição atmosférica, inundações periódicas e geadas leves durante e no final da primavera e no início do verão, foram atribuídos à formação de anéis de crescimento falsos no lenho de árvores (YOUNG et al., 1993; KURCZYNSKA et al., 1998; KOZLOV e KISTERNAYA, 2004). Ainda, alguns estudos fazem conexões entre a desfolhação causada por insetos e a formação de anéis de crescimento falsos, enquanto outros afirmam não haver esta conexão (PRIYA e BHAT, 1998; SALLEO et al., 2003). Lloyd et al. (1996) detectaram a formação de anéis de crescimento falsos no lenho de árvores de *Abies balsamea* na estação de crescimento, em resposta às altas temperaturas e ao fotoperíodo de até 15 horas/dia.

Nas árvores das 2 espécies supõem-se que, além dos eventos climáticos adversos (como os mencionados) a presença de anéis de crescimento falsos ou incompletos seja relacionada ao constante estresse do ambiente urbano, afetando o crescimento radial das árvores, como a impermeabilização e compactação do solo, solos com teor desequilibrado de minerais e menor porcentagem de matéria orgânica, condições de radiação solar, vento, temperatura e umidade, poluição atmosférica, competição por água e nutrientes, podas, injúrias mecânicas, prolongamento do fotoperíodo com a iluminação artificial, etc.

Tabela 11 – Controle de qualidade da sincronização dos anéis de crescimento de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*.

Espécie	Sítio	Período de tempo	Anos	Intercorrelação	Sensibilidade média	Total de árvores	Total de amostras	Total de anéis
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	1956-2009	54	0,578	0,562	6	16	657
	Periurbano	1984-2010	27	0,584	0,346	8	13	298
	Rural	1968-2011	44	0,526	0,430	5	12	346
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	1958-2009	52	0,517	0,494	11	18	656
	Periurbano	1987-2010	24	0,614	0,368	9	17	264
	Rural	1978-2011	34	0,531	0,436	7	13	410

Figura 23 – Seções transversais do lenho das árvores de *C. pluviosa* (A-B) e *T. pentaphylla* (C-D). (A e C) falso anel de crescimento; (B e D) anel de crescimento incompleto. As setas indicam a demarcação dos limites dos anéis de crescimento

Após o controle de qualidade da datação foram construídas as cronologias utilizando o programa ARSTAN (COOK e HOLMES et al., 1986), através da padronização das séries individuais de largura dos anéis de crescimento. Dessa forma, removeram-se as tendências não climáticas, relacionadas com a idade das árvores, procedendo-se o cálculo dos valores

padronizados de árvores individuais, com diferentes taxas anuais de crescimento, em uma função média (Figuras 24 e 25).

Predominaram os ajustes dos modelos linear decrescente, exponencial negativo e médio. O modelo clássico (exponencial negativo) demonstra que as árvores mostram maior taxa de crescimento do tronco nos primeiros anos e, ao atingirem a idade adulta, ocorre uma redução exponencial da largura dos anéis de crescimento, até valores mais ou menos constantes. O modelo linear decrescente indica que estas se encontram, ainda, na fase de crescimento juvenil, com redução da largura dos anéis de crescimento, sem atingir valores constantes. Já o modelo que utiliza a média na padronização foi aplicado para as árvores que apresentam taxas de crescimento mais ou menos constantes ou cíclicas ao longo dos anos. A necessidade da aplicação de 3 modelos para o ajuste da função que melhor expressa a tendência do crescimento de cada árvore indica que estas possuem tendências de crescimento distintas, respondendo de maneira diferente aos fatores do meio durante o seu desenvolvimento.

As árvores das duas espécies apresentam heterogeneidade na idade, com poucas árvores de maior idade no início da construção da cronologia, sendo que, gradativamente, as árvores mais novas vão sendo incluídas na série. A possibilidade de construção das cronologias para as duas espécies permite demonstrar o nível de resposta das árvores as variações das condições do ambiente, uma vez que os dados mostraram a presença de padrões de crescimento semelhantes entre as árvores da mesma espécie, crescendo em um mesmo sítio.

Já a confrontação das séries cronológicas das duas espécies (Tabela 12) demonstrou que não existe uma sincronização dos mesmos padrões entre as árvores da mesma espécie crescendo em sítios diferentes, explicado pelos baixos valores do coeficiente de correlação obtidos. Dessa forma, fica claro que as especificidades do ambiente no qual estão crescendo (ex.: edáfica, climática, competição, grau de intervenção antrópica, entre outras), determinam o ritmo crescimento radial do tronco dessas árvores.

Figura 24 – Séries cronológicas padronizadas e número de amostras de árvores de *C. pluviosa*, nos 3 sítios de estudo

Figura 25 – Séries cronológicas padronizadas e número de amostras de árvores de *T. pentaphylla*, nos 3 sítios de estudo

Tabela 12 – Análise de correlação entre as séries padronizadas dos 3 sítios, para as 2 espécies do estudo

Espécie	Sítio	Sítio		
		Urbano	Periurbano	Rural
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	.	-0,121	-0,310
	Periurbano	.	.	-0,219
	Rural	.	.	.
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	.	-0,010	-0,315
	Periurbano	.	.	-0,363
	Rural	.	.	.

5.6 Variáveis climáticas e crescimento radial das árvores: dendroclimatologia

A análise da correlação entre as cronologias dos anéis de crescimento do lenho das árvores das 2 espécies, nos 3 sítios e as variáveis climáticas (temperatura mensal média e precipitação mensal acumulada) mostrou períodos mensais de influência no crescimento radial anual do tronco das árvores (Tabelas 13-16, valores em negrito) e na determinação das tendências de crescimento (Figuras 26 e 27).

Ainda, a análise de correlação revelou respostas divergentes entre as árvores de *C. pluviosa* e de *T. pentaphylla* e entre os 3 sítios avaliados, ficando claro que as árvores das 2 espécies, crescendo e se desenvolvendo em ambientes distintos, respondem de maneira diferenciada aos fatores climáticos ao longo do período de 12 meses que corresponde a formação de um anel de crescimento (anual).

Nas árvores de *C. pluviosa* dos sítios urbano e periurbano não se observaram correlações significativas entre a largura dos anéis de crescimento e as temperaturas médias mensais; por outro lado, no sítio rural, a temperatura exerce influência negativa no crescimento radial do tronco das árvores desta espécie nos meses de março (início da estação de outono) e junho (meados da estação de inverno). Da mesma forma, os resultados da análise para a precipitação não revelou influência dessa variável nas árvores da espécie nos sítios urbano e periurbano, enquanto para as árvores do sítio rural, o mês de novembro, final da estação de primavera e próximo ao início da estação chuvosa, está correlacionado de maneira positiva e significativa.

A análise da Tabela 13 indica que as árvores da espécie localizada no sítio rural foram as que apresentaram a maior sensibilidade às variações dos fatores climáticos ao longo do período de formação dos anéis de crescimento no seu lenho (agosto do ano anterior a julho do ano corrente). No entanto, a ausência de resposta climática nas árvores dos sítios urbano e periurbano levou a realização de novas análises considerando-se os valores médios de temperatura e precipitação dos meses que compõem cada uma das 4 estações do ano (CHAGAS et al., 2012), sendo elas: primavera (setembro-outubro-novembro), verão (dezembro-janeiro-fevereiro), outono (março-abril-maio) e inverno (junho-julho-agosto).

Os resultados para as árvores de *C. pluviosa* (Tabela 14) indicam que, para a temperatura, o efeito do agrupamento dos valores em estações do ano não resultou, novamente, em respostas significativas das árvores dos sítios urbano e periurbano; no entanto

para as árvores do sítio rural, o agrupamento mascarou o efeito negativo estabelecido para os meses março e junho (vide Tabela 13).

Para o parâmetro climático precipitação, somente as árvores do sítio urbano correlacionaram de maneira significativa, apresentando relação negativa com os meses da estação de inverno, caracterizada pela presença de déficit hídrico. Embora a análise indique correlações positivas entre os meses de verão e o crescimento do tronco das árvores dos sítios periurbano e rural, as mesmas não foram significativas. Também, a precipitação do mês de novembro, significativa para as árvores do sítio rural, quando agrupada aos meses de setembro e outubro, tem o seu efeito enfraquecido, deixando de exercer função positiva no crescimento dessas árvores.

Os resultados da análise climática das árvores de *T. pentaphylla*, na avaliação mensal dos fatores climáticos, são apresentados na Tabela 15. Para o sítio urbano, as correlações significativas e positivas foram estabelecidas nos meses de maio e abril (outono) para as variáveis temperatura e precipitação, respectivamente. No sítio periurbano, as condições térmicas dos meses de outubro e novembro (primavera), influenciam positivamente o crescimento do tronco das árvores desta espécie, não sendo detectada correlação significativa para a variável climática precipitação. Por fim, as árvores do sítio rural responderam positivamente à temperatura dos meses de janeiro e março e à precipitação do mês referente ao início da estação chuvosa (novembro) e negativamente ao mês que marca o início da diminuição das chuvas (abril).

A análise da resposta climática das árvores, considerando-se as estações do ano, evidenciou o efeito positivo da temperatura dos meses de maio, outubro, novembro e janeiro para as árvores de *T. pentaphylla* dos sítios urbano, com os meses de outono, periurbano (Tabela 16), com os meses de primavera, e rural, com os meses de verão, respectivamente. Somente para as árvores da espécie localizadas no sítio rural, a correlação positiva do mês de março não se manteve na comparação dos resultados da análise para a estação de outono. Para a precipitação foram observadas correlações positivas com as estações de verão e outono no sítio urbano, negativa para os meses de inverno para o sítio periurbano e positivas nos meses do início do período de crescimento (primavera) no sítio rural.

Tabela 13 - Correlações entre as séries cronológicas das árvores de *C. pluviosa*, dos 3 sítios do estudo, e as variáveis climáticas temperatura mensal média e precipitação mensal acumulada

Ano	Mês	Temperatura mensal média			Precipitação mensal acumulada		
		Sítio			Sítio		
		Urbano	Periurbano	Rural	Urbano	Periurbano	Rural
Anterior	AGO	0,199	0,040	-0,028	0,176	-0,104	0,074
	SET	-0,223	0,079	-0,161	0,050	0,026	0,028
	OUT	0,241	-0,028	0,080	-0,032	0,074	-0,066
	NOV	0,057	-0,068	0,016	-0,053	0,045	0,309
	DEZ	-0,074	-0,215	-0,180	-0,060	-0,165	0,173
Corrente	JAN	0,018	-0,083	-0,221	0,002	-0,259	-0,051
	FEV	-0,035	0,088	-0,273	-0,090	-0,161	0,043
	MAR	-0,046	0,197	-0,317	0,131	0,144	-0,071
	ABR	0,026	-0,062	-0,195	0,094	-0,083	-0,107
	MAI	0,024	0,066	-0,205	-0,052	-0,136	0,110
	JUN	-0,151	0,236	-0,336	-0,089	-0,239	0,056
	JUL	-0,055	0,042	-0,163	-0,125	0,055	-0,167

* Valores em negrito indicam correlações significativas (Pearson - 95%)

Tabela 14 - Correlações entre as séries cronológicas das árvores de *C. pluviosa*, dos 3 sítios do estudo, e as variáveis climáticas temperatura mensal média e precipitação mensal acumulada das 4 estações do ano

Ano	Meses	Temperatura mensal média			Precipitação mensal acumulada		
		Sítio			Sítio		
		Urbano	Periurbano	Rural	Urbano	Periurbano	Rural
Anterior	SON	0,035	-0,004	0,012	-0,028	0,083	0,172
	D*JF	-0,047	-0,087	-0,268	-0,048	-0,297	0,063
Corrente	MAM	-0,012	0,090	-0,282	0,090	0,014	-0,036
	JJA	-0,095	0,205	-0,252	-0,284	-0,024	-0,028

* Dezembro do ano anterior; valores em negrito indicam correlações significativas (Pearson - 95%)

Tabela 15 - Correlações entre as séries cronológicas das árvores de *T. pentaphylla*, dos 3 sítios do estudo, e as variáveis climáticas temperatura mensal média e precipitação mensal acumulada

Ano	Mês	Temperatura mensal média			Precipitação mensal acumulada		
		Sítio			Sítio		
		Urbano	Periurbano	Rural	Urbano	Periurbano	Rural
Anterior	AGO	0,072	0,258	0,224	0,029	0,289	-0,088
	SET	-0,080	-0,036	0,328	0,044	0,063	0,111
	OUT	-0,057	0,423	0,165	-0,148	-0,198	0,151
	NOV	0,167	0,558	0,117	-0,061	-0,204	0,389
	DEZ	0,141	0,182	0,361	0,145	-0,135	0,182
Corrente	JAN	0,230	-0,181	0,493	0,237	-0,208	0,093
	FEV	0,042	0,326	0,149	0,239	-0,126	0,239
	MAR	0,202	-0,131	0,345	0,134	0,306	0,055
	ABR	0,225	-0,243	0,287	0,374	0,219	-0,451
	MAI	0,287	0,345	-0,273	0,189	-0,161	-0,095
	JUN	0,102	0,359	0,075	-0,042	-0,339	-0,173
	JUL	-0,088	0,075	0,288	0,161	-0,214	0,040

* Valores em negrito indicam correlações significativas (Pearson - 95%)

Tabela 16 - Correlações entre as séries cronológicas das árvores de *T. pentaphylla*, dos 3 sítios do estudo, e as variáveis climáticas temperatura mensal média e precipitação mensal acumulada das 4 estações do ano

Ano	Meses	Temperatura mensal média			Precipitação mensal acumulada		
		Sítio			Sítio		
		Urbano	Periurbano	Rural	Urbano	Periurbano	Rural
Anterior	SON	0,031	0,466	0,203	-0,110	-0,212	0,392
	D*JF	0,153	0,150	0,470	0,379	-0,256	0,240
Corrente	MAM	0,285	0,006	0,218	0,298	0,260	-0,182
	JJA	-0,049	0,296	0,253	0,081	-0,607	-0,193

* Dezembro do ano anterior; valores em negrito indicam correlações significativas (Pearson - 95%)

Embora a maioria dos estudos desta natureza em árvores de espécies tropicais e subtropicais demonstre que os processos fisiológicos que influenciam na atividade do câmbio vascular das plantas são mais ativos durante o período de maior temperatura e precipitação (primavera-verão), e que vão se restringindo ao longo do período mais frio e seco (outono-inverno), a análise dendroclimatológica é, muitas vezes, complexa, fazendo-se necessário a compreensão detalhada de aspectos da (i) biologia e da fenologia das espécies e (ii) de possível influência de especificidades dos locais onde as árvores estão localizadas.

Em relação ao item (i) *biologia e da fenologia das espécies*, sabe-se que as árvores das espécies com diferentes estratégias de crescimento do tronco tendem a reagir de maneira

distinta aos eventos climáticos. Worbes (1999) observou que as árvores de *Swietenia macrophylla* e de *Pterocarpus vernalis* perdem as suas folhas nos meses de dezembro a janeiro, no entanto, podem utilizar a precipitação durante os meses de transição entre as estações chuvosa e seca (agosto e setembro) para a produção de amido, que é subsequentemente usado na formação de madeira. Para árvores de *Bombacopsis quinata* a queda das folhas ocorre alguns meses antes e esta espécie utiliza a precipitação do período chuvoso para seu crescimento. As árvores das espécies sempre verdes, como as do *Pinus caribaea* e *Terminalia guianensis*, mostraram que reagem às variações de precipitação ao longo do ano e podem utilizar até as escassas chuvas da estação seca para a produção de madeira. As árvores de *Tectona grandis* demonstraram, também, um comportamento semelhante, diferentemente do observado para as árvores de *Cedrela odorata* que demonstrou um maior crescimento radial do tronco no final da estação chuvosa, quando os níveis de precipitação já são baixos e a árvore perde as suas folhas.

Por outro lado, Callado et al. (2004), no sudeste do Brasil, verificaram que o crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Tabebuia umbellata* foi maior durante a estação chuvosa, com a presença folhas maduras nas árvores, sendo que nenhum aumento tenha sido observado durante a estação seca ou durante as fenofases de queda das folhas e de floração. Os resultados da análise dendroclimatológica de árvores de *Toona ciliata*, na Austrália, indicaram que a precipitação dos meses de março a junho e a temperatura dos meses de outubro, novembro e abril, todos do ano anterior ao início da estação de crescimento, são determinantes no crescimento em diâmetro das árvores (HEINRICH e BANKS, 2005).

As correlações positivas entre a precipitação dos meses de dezembro e janeiro, e negativas para esse mesmo período, foram encontradas por Trouet et al. (2006), para as árvores de *Brachystegia spiciformis* (Caesalpinioideae), em Zâmbia, África. Segundo os autores, apoiados por outros trabalhos, a elevação da taxa de respiração das plantas em função do aumento da temperatura durante a estação chuvosa resulta em uma maior perda de carbono assimilado, levando a uma redução do crescimento radial das árvores.

A influência positiva dos níveis de precipitação durante a estação chuvosa e negativa ao final do período seco na formação do lenho de árvores de *Cedrela sp* são apresentadas por Dünisch et al. (2003), Brien e Zuidema (2004), Marcati e Angyalossy (2006) e Lobão (2011). No Equador, Bräuning et al. (2009), avaliaram o crescimento radial do tronco de árvores de *Cedrela montana* através de faixas dendrométricas, de estudos anatômicos do

câmbio vascular e da análise dos anéis de crescimento. Os resultados da aplicação das 2 primeiras técnicas evidenciaram que a atividade cambial é maior durante os meses de janeiro e abril. No estudo dendroclimatológico, entre as 5 variáveis climáticas testadas, somente a temperatura do período de crescimento (janeiro-abril) correlacionou-se de maneira significativa e positiva.

Ainda, Volland-Voigt et al. (2011) estudaram a resposta climática de árvores de *Tabebuia chrysantha* em dois diferentes ambientes no sul do Equador, evidenciando uma relação positiva entre o crescimento do tronco das árvores com a precipitação e o déficit de pressão de vapor na estação chuvosa de 10 meses de duração na Floresta Tropical Baixa Montana e de 4 meses para a Floresta Seca. Chagas et al. (2012), observaram uma redução na sensibilidade da resposta aos índices de precipitação da estação chuvosa e temperatura próximos ao início do inverno em árvores urbanas de *Tectona grandis* quando comparadas às árvores de ambiente florestal, no município de Piracicaba, São Paulo, Brasil.

Em relação ao item (ii) *possível influência das especificidades dos locais onde as árvores estão localizadas nos sítios de estudo*, considerando, sobretudo, as áreas urbanas que aparecem com maior frequência nos estudos relacionados com o crescimento do tronco das árvores. Entre estes fatores, a poluição atmosférica possui destaque uma vez que é considerada importante, pois pode alterar ou dissociar as relações entre o clima e o crescimento (MCCLLENHAGEN, 1999), resultando em condições que limitam ainda mais o crescimento (PUCKETT, 1982; MCCLLENHAGEN e DOCHINGER, 1985). Kurczynska et al. (1997) avaliaram a anatomia do lenho do caule de árvores de *Pinus sylvestris* afetadas pelas atividades poluidoras na região de Varsóvia, Polônia, com os resultados indicando um decréscimo no número de células do câmbio, do xilema e do floema, bem como a formação de anéis de crescimento falsos no lenho.

Outros estudos demonstram que as relações entre o clima e o crescimento do tronco das árvores podem mudar ao longo do tempo de acordo com as variações dos fatores de estresse, como a deposição ácida ou a competição entre árvores (LEBLANC, 1993; BRAKEL, 1996; ROZAS, 2001).

A redução de crescimento do tronco de árvores de diferentes espécies ocorrentes em locais de altitude elevada na Europa e no nordeste dos Estados Unidos foi atribuída às perturbações e, em particular, a deposição ácida (JOHNSON e SICCAMO 1983; HORNBECK e SMITH, 1985; LEBLANC et al. 1987). Além da redução na largura dos anéis de crescimento, um aumento dos sinais não climáticos (alta frequência) no crescimento e uma

tendência de afastamento dos padrões de crescimento previstos em relações puramente climáticas têm sido observados em áreas poluídas.

Com essa abordagem, Nöjd e Reams (1996) avaliaram as variações do crescimento do tronco de árvores de *Pinus sylvestris* e as relações climáticas em um gradiente de poluição na Península de Kola, Rússia, sendo observada forte dependência do crescimento com as temperaturas do verão, típica nas árvores da espécie crescendo em altas latitudes, além de não mostrar sensibilidade aos efeitos da poluição; as mudanças na relação clima-crescimento das árvores foram observadas somente décadas depois das tendências do crescimento do tronco começarem a declinar.

O estudo de 8 populações de árvores de *Pinus sylvestris* na Polônia, realizado por Wilczynski (2006) indicou o efeito negativo da exposição a níveis muito elevados de SO₂ durante os anos 1960 e 1990, evidenciados através da variação da largura dos anéis de crescimento, com pequena similaridade entre as cronologias das populações, além da ausência de sinais climáticos durante o período; após 1990, o processo de recuperação das árvores de *Pinus sylvestris* ficou evidente.

As pesquisas realizadas no município de Shenyang, China, por Chen et al. (2011) indicaram o efeito do aumento das atividades antrópicas pela avaliação dos anéis de crescimento no tronco das árvores de *Pinus tabulaeformis* crescendo em condições urbanas, suburbanas e rurais. Nas regiões rural para a urbana e no período de crescimento comum (1901-2000) foi detectada uma significativa diminuição na resposta das árvores aos fatores climáticos e nos valores de sensibilidade média. Ainda, através da remoção dos sinais climáticos do crescimento das árvores urbanas, foram estabelecidos os períodos de perturbações mais intensas e diretamente correlacionados com os índices de variação e de densidade populacional de Shenyang.

Os resultados (Tabelas 13, 15) associados às informações contidas nos itens (i) e (ii), fundamentados na literatura, permitem considerar que:

- (i) as variações encontradas nos padrões de crescimento do tronco das árvores das 2 espécies (item 5.5) e na resposta climática, na comparação entre as árvores dos 3 sítios, indicam a influência de fatores não climáticos determinando o ritmo de crescimento das árvores;
- (ii) as respostas climáticas observadas nas árvores das 2 espécies no sítio rural são concordantes com os trabalhos da literatura especializada, com os fatores climáticos

exercendo efeitos positivos e negativos no crescimento do tronco das árvores durante as estações de primavera/verão e outono/inverno, respectivamente;

(iii) a ausência de respostas climáticas para as variáveis temperatura e precipitação nas árvores de *C. pluviosa* dos sítios urbano e periurbano, e somente da precipitação para as árvores de *T. pentaphylla* do sítio periurbano, aliado as condições do ambiente onde estão crescendo, constituem a principal evidência da existência de alterações nos padrões de resposta climática;

(iv) nas árvores do sítio periurbano, as correlações não significativas entre o crescimento do tronco nas 2 espécies com a precipitação indicam a não dependência a essa fator climático. Nesse contexto e por estarem localizadas, em sua maioria, no interior de propriedades particulares, coexistindo com outras espécies arbustivas ornamentais e arbóreas frutíferas, sugere-se que possam ser indiretamente beneficiadas pela prática de irrigação;

(v) as árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* do sítio urbano devem estar sendo afetadas negativamente pela proximidade das fontes estacionárias e móveis de poluição atmosférica (vide itens 3.9, 4.1). Além dos elevados níveis de poluentes no ambiente, observam-se fatores de estresse que podem influenciar o crescimento do tronco das árvores, como: impermeabilização e compactação do solo, sinais de podas, outras injúrias mecânicas e prolongamento da exposição ao fotoperíodo através da luz artificial nesse ambiente;

(vi) a correlação positiva entre a precipitação do mês de abril e o crescimento do tronco das árvores de *T. pentaphylla* do sítio urbano indica que estas dependem do prolongamento da estação chuvosa para o maior crescimento.

5.7 Crescimento radial do tronco das árvores

A avaliação do crescimento radial das árvores das 2 espécies, através dos parâmetros de incremento acumulado (IA) e de incremento médio anual (IMA) (Tabela 17) indicam que, de modo geral, as árvores apresentam diferenças no ritmo de crescimento; da mesma forma, observa-se na comparação do crescimento das árvores da mesma espécie em diferentes sítios.

Considerando o período comum de crescimento do tronco das árvores, de 18 anos para as de *C. pluviosa* e de 13 para as de *T. pentaphylla*, observam-se diferenças estatisticamente significativas nos valores de IA e IMA, a saber: (i) diferença entre as árvores de *C. pluviosa*

dos sítios periurbano e rural e as do sítio urbano, (ii) diferença entre as árvores de *T. pentaphylla* do sítio periurbano e as dos sítios urbano e rural (Figuras 26 e 27).

As árvores das 2 espécies que cresceram no sítio periurbano apresentaram os maiores valores de IA e IMA, reforçando a hipótese, indicada no item anterior, do efeito positivo da irrigação no crescimento do tronco no período inicial de crescimento (e ainda atual). Outra possibilidade é o aproveitamento e fixação do CO₂ pelas árvores do sítio periurbano em relação ao rural, com a indicação pela fisiologia de que as maiores concentrações de CO₂ aumentam, geralmente, a relação entre a carboxilação e a água transpirada - eficiência do uso da água - elevando a produtividade das plantas (FRANCEY e FARQUHAR, 1982; LAMARCHE et al., 1984). Apesar dos experimentos em nível de ecossistema corroborarem esta tese, os resultados dos trabalhos que aplicam a análise dos anéis de crescimento e que indicam essa associação geram um debate que, ainda, apresenta-se em aberto. O principal argumento é o da existência de uma limitação do método na capacidade de avaliação dos mecanismos, a longo prazo, das relações entre a planta e a atmosfera, uma vez que a largura dos anéis de crescimento varia com o nível de déficit hídrico no solo, competição entre árvores, fatores climáticos, estresse antropogênico, deposição de N, etc. (WOODWARD, 1993). Neste sentido, MacCaroll e Loader (2004), afirmaram que os estudos de avaliação do crescimento do tronco das árvores, através da dendrocronologia, combinados com a análise isotópica podem auxiliar na busca de respostas às questões formuladas citando, como exemplo, os isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) que geram informações da relação entre a condutância estomática (trocas gasosas) nas plantas e as condições atmosféricas ao longo do tempo. Estas duas ferramentas aplicadas podem fornecer uma base fisiologicamente útil para decifrar o passado e prever as tendências futuras das interações entre vegetação e a atmosfera. Nesse contexto, a análise de isótopos de carbono é recomendada como etapa futura para a complementação deste estudo, na comparação dos efeitos do CO₂ - que influenciam os valores de $\delta^{13}\text{C}$ nas plantas - no crescimento das árvores dos 3 sítios.

Ainda, a respeito dos resultados do IA e IMA do tronco das árvores das 2 espécies no período comum de crescimento, observa-se que as árvores urbanas apresentaram, em função do ambiente em que estão inseridas, os menores valores. Esse resultado corrobora a hipótese do estresse causado pela pressão do ambiente urbano na redução do incremento radial do tronco dessas árvores, sobretudo pela presença de poluentes atmosféricos.

Nesse aspecto, Long e Davis (1989) avaliaram o crescimento de árvores de 3 populações de *Quercus alba* em diferentes distâncias de usina de energia térmica de carvão

mineral dos EUA, em relação ao controle, e verificaram significativa redução do crescimento do tronco das árvores mais próximas à usina e com maior exposição contínua ao SO₂ e de outros poluentes.

Esta resposta foi observada, da mesma forma, no município de Salt Lake City, EUA, com a redução do crescimento em diâmetro do tronco de árvores de *Pseudotsuga menziesii* var. *glauca* expostas às altas concentrações atmosféricas de O₃, com redução da fotossíntese, do vigor da planta e no armazenamento e alocação de carboidratos (WAGNER e BAKER, 2003). No entanto, no Brasil, Medeiros et al. (2008) não observaram variações significativas no crescimento do tronco de árvores de *Araucaria columnaris* em um ambiente caracterizado pelo intenso tráfego veicular e forte influência antropogênica.

A análise dos resultados (Tabela 17) considerando a idade total das árvores indica que não houve diferenças significativas entre os valores de IA das árvores dos 3 sítios, para as 2 espécies. Embora não significativa, o IA do tronco das árvores de *C. pluviosa* foi maior no sítio urbano, seguido do periurbano e rural. Para as árvores de *T. pentaphylla*, houve apenas a alternância entre os sítios periurbano e rural (Figura 27), com maior valor obtido no sítio urbano.

A análise do número médio de anéis de crescimento no tronco das árvores revela que não existe diferença significativa entre as árvores de *C. pluviosa* nos sítios periurbano e rural; para as árvores de *T. pentaphylla* as médias diferiram significativamente entre os 3 sítios. Esses resultados definem, juntamente, com os de IA, os valores de IMA para o período total de crescimento, que indicaram o maior incremento anual do tronco das árvores das 2 espécies no sítio periurbano em relação aos demais sítios.

A relação direta entre crescimento radial de árvores e as características químicas e de fertilidade do solo é descrita por alguns autores na literatura especializada (PENNINCKX et al., 1999; BOONE et al., 2004; HELAMA et al., 2009). No caso das árvores do estudo, a qualidade do solo não aparece como um fator que define as variações encontradas no crescimento das árvores nos 3 sítios. Como exemplo, podemos citar os maiores valores de IA e IMA obtidos para as árvores do sítio periurbano das duas espécies, crescendo em solos tidos como de menor fertilidade (menores valores de V% e de M.O), com menores teores fitodisponíveis dos elementos B, Ca, Cu, Mn, Mg, P, Ni e maior de Al, elemento associado a redução do crescimento (RONQUIM, 2010), em comparação aos sítios urbano, rural. Ainda, o maior crescimento observado para as árvores de *C. pluviosa* do sítio rural em comparação as do sítio urbano não parece possuir relação com os resultados obtidos na análise do solo onde

estas árvores estão crescendo: os solos urbanos apresentaram maiores valores de M.O, dos macronutrientes P, Ca, K, dos micronutrientes B, Cu, Fe, Ni, Mn e Zn e também de Cd. Da mesma forma, para as árvores de *T. pentaphylla*, embora os valores de M.O, V%, Ca, K, Mg, Fe, Mn, Ni e Pb tenham sido superiores para as árvores do sítio rural em relação as do sítio urbano, a avaliação do crescimento revelou não haver diferenças significativas entre elas quanto aos valores de IA e IMA.

Tabela 17 – Valores médio e, entre parênteses, mínimo e máximo de incremento acumulado (IA), incremento médio anual (IMA) e do número de anéis de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*, dos 3 sítios do estudo, considerando-se os períodos comum e total de crescimento das árvores

Espécie	Sítio	Período comum		Período total		Nº de anéis (anos)
		IA (mm)	IMA (mm)	IA (mm)	IMA (mm)	
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	74,12 a (58,43-105,45)	4,12 a (3,25-5,86)	163,04 a (107,59-228,70)	3,98 a (3,29-5,03)	41 b (27-53)
	Periurbano	119,45 b (69,04-150,53)	6,64 b (3,84-8,36)	140,82 a (84,14-166,53)	6,23 b (3,82-8,36)	23 a (18-27)
	Rural	99,47 b (61,67-125,53)	5,53 b (3,43-6,97)	131,82 a (110,29-148,08)	4,94 a (3,03-6,59)	29 a (20-43)
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	57,3 a (24,06-108,82)	4,41 a (1,85-8,37)	149,80 a (93,33-230,97)	4,15 a (2,97-6,79)	37 c (27-52)
	Periurbano	106,89 b (74,18-158,51)	8,22 b (5,71-12,19)	121,66 a (75,64-200,02)	7,67 b (5,40-9,75)	16 a (13-22)
	Rural	61,76 a (39,77-90,08)	4,75 a (3,06-6,93)	123,05 a (85,95-184,53)	4,99 a (3,74-6,08)	25 b (22-33)

* Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey, α 0,05

Figura 26 – Relação entre incremento radial acumulado do tronco e a idade biológica das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* nos 3 sítios de estudo, considerando-se o período comum de crescimento

Figura 27 – Relação do incremento radial acumulado do tronco e a idade biológica das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*, nos 3 sítios de estudo. Linhas verticais indicam os períodos comuns de crescimento para os 3 sítios de estudo

5.8 Variação temporal na intensidade das linhas de emissão de macro e micronutrientes nos anéis de crescimento do lenho de árvores: LIBS

A aplicação da análise de componentes principais (PCA) permitiu a redução do conjunto de dados desta etapa da pesquisa (32 árvores x 12 anéis de crescimento x 12 elementos químicos) possibilitando a análise exploratória geral das amostras do lenho, verificando as semelhanças entre as mesmas e identificando os *outliers*.

Considerando-se todas as linhas de emissão (12 elementos químicos) e com os dados centrados na média foram utilizadas 96 amostras do lenho compreendendo 6 classes (árvores de 2 espécies x 3 sítios de estudo). Para obter esse número de amostras, foram agrupadas as informações (média) dos 4 anéis de crescimento da região do lenho analisada por LIBS (vide

item 4.10.1) identificadas como inicial, intermediária e final. Ainda, foi selecionada apenas uma componente principal, responsável por 90% do total da variância dos dados.

Verifica-se a tendência da constituição de 2 grupos (Figura 28), sendo o primeiro formado pelas amostras do lenho das árvores de *T. pentaphylla* dos sítios periurbano e rural e o segundo pelas amostras do lenho das árvores de *C. pluviosa*, também do sítio rural. As demais amostras do lenho das árvores de *C. pluviosa* dos sítios urbano e periurbano e de *T. pentaphylla* do sítio urbano projetaram-se acima e abaixo do eixo da componente principal.

Os resultados da PCA das amostras do lenho de cada uma das 2 espécies (Figuras 29 e 30) indicam que, para as amostras do lenho de *C. pluviosa* não ocorreu, da mesma forma, a constituição de grupos bem definidos, observando-se a tendência geral de separação da maior parte das amostras do lenho do sítio periurbano em relação às do sítio rural (Figura 29).

No entanto, nas amostras do lenho das árvores de *T. pentaphylla* dos sítios periurbano e rural verifica-se a formação de grupos distintos em relação às do sítio urbano, com mais de 90% das amostras localizadas em lados opostos ao eixo da componente principal (Figura 30).

A análise dos *loadings* (Figura 31), que representam as variáveis que têm maior importância para a disposição das amostras do lenho nos gráficos da análise PCA, evidenciou a maior contribuição dos macronutrientes Mg e Ca (Figura 31A-C), seguidos dos micronutrientes Cu e Si (Figura 31C). Os macronutrientes Mg e Ca são relativamente abundantes no solo dos 3 sítios amostrados mas, também, variam de maneira importante entre os mesmos, sendo considerados na literatura como essenciais para a nutrição e crescimento das plantas (PETERSON e ANDERSON, 1990). As variações desses macronutrientes no solo podem estar associadas ao aumento do elemento no ambiente específico como, por exemplo, o que ocorre com Mg em função dos processos industriais, pela emissão pelos veículos automotores e pela re-suspensão da poeira do solo (LAH, 2012) ou, ainda, pelas alterações na absorção e fixação de Ca e Mg no lenho associadas à deposição de poluentes que alteram as características químicas do solo, como o seu pH (SMITH e SHORTLE, 1996; WATMOUGH, 2002), especialmente próximo da região da zona radicular das árvores, alterando as características da seiva mineral (SHORTLE et al., 1995).

Foram detectadas diferenças significativas na média da intensidade das linhas de emissão dos elementos Cu, Na e P entre o sítio urbano e os sítios periurbano e rural para as árvores de *C. pluviosa*; para as árvores de *T. pentaphylla* as diferenças entre os sítios foram detectadas para Cu, Mg, Si e Zn cujos valores são, em sua maioria, maiores no lenho das

árvores do sítio urbano (Tabela 18). Para os demais elementos não foram observadas diferenças significativas embora tenham sido detectadas variações importantes no valor médio da intensidade entre os sítios para, por exemplo o Al, Ca, Fe, Mn, em função da grande amplitude dos valores de intervalo de confiança (limites superior e inferior) (Anexos E1,2).

Da mesma forma, foram detectadas diferenças significativas entre as médias de intensidade de emissão das porções inicial, intermediária e final do lenho das árvores de *C. pluviosa* para B, Ca, Fe, Mn, Na, Si e Zn e para as árvores de *T. pentaphylla* para todos os elementos, à exceção do Cu (Tabela 19); para esse conjunto de dados os resultados da estatística descritiva são apresentados nos Anexos E3-8.

A análise da correlação entre a intensidade de emissão média dos elementos e o ano de determinação para as árvores de *C. pluviosa* (Tabela 20) e de *T. pentaphylla* (Tabela 21) evidencia que a principal tendência é o da diminuição dos valores no sentido medula-casca do perfil radial do lenho, fundamentada nos valores de correlação significativos e negativos. Observa-se, também, que a frequência de ocorrência desse padrão diminui ao longo do gradiente de qualidade ambiental/urbanização existente entre os sítios, sendo maior no sítio rural e menor no urbano. Essa avaliação é importante na interpretação dos resultados da correlação existente entre cada um dos elementos químicos (vide continuidade das Tabelas 20 e 21). Neste sentido o estabelecimento dos valores de correlação é dado em função da similaridade existente entre as tendências dos valores de intensidade de emissão ao longo dos pontos de determinação no lenho (anéis de crescimento) que seguem uma escala cronológica. Dessa forma, os valores de correlação significativos são, majoritariamente, positivos, indicando o grau de relacionamento entre os elementos químicos.

Para o lenho das árvores das 2 espécies, não foi observada correlação significativa ($p < 0,01$) entre a intensidade das linhas de emissão dos elementos químicos e a largura do anel de crescimento, indicando que a variação anual do crescimento radial do tronco das árvores não determina a presença dos elementos no lenho das árvores das 2 espécies.

A variação temporal da intensidade das linhas de emissão dos elementos químicos no lenho das árvores de *C. pluviosa* (Figuras 32 e 33) e de *T. pentaphylla* (Figuras 34 e 35) permite a identificação de 6 modelos de variação, a saber:

1º modelo, caracterizado pela diminuição dos valores de intensidade no sentido dos primeiros para os últimos anos: Ca e K (2 espécies e os 3 sítios), Al (*C. pluviosa* sítios periurbano e rural; *T. pentaphylla* sítios periurbano e rural), B (*T. pentaphylla* para os 3 sítios), Fe (*C.*

pluviosa sítio rural; *T. pentaphylla* sítios periurbano e rural), Mn (*C. pluviosa* sítios periurbano e rural; *T. pentaphylla* para os 3 sítios), Si (*C. pluviosa* sítio rural; *T. pentaphylla* sítio rural), Na (*T. pentaphylla* sítio rural) e Zn (*C. pluviosa* sítios periurbano e rural);

2º modelo, caracterizado pelo aumento dos valores entre os anos de 1985 e 1990, seguido de queda ou estabilização: Al (*T. pentaphylla* sítio urbano), B (*C. pluviosa* sítio periurbano), Cu (*C. pluviosa* sítio urbano), Fe (*T. pentaphylla* sítio urbano), Mg (*C. pluviosa* sítio urbano), Na (*C. pluviosa* sítio urbano; *T. pentaphylla* sítio urbano) e P (*T. pentaphylla* sítio urbano);

3º modelo, caracterizado pela diminuição dos valores até próximo dos últimos anos, seguido de aumento: Al (*C. pluviosa* sítio urbano), Fe (*C. pluviosa* sítio urbano), Mn (*C. pluviosa* sítio urbano) e Si (*C. pluviosa* sítio urbano);

4º modelo, caracterizado pelos valores constantes até próximo dos últimos anos, seguido de aumento: Cu (*T. pentaphylla* sítio urbano), Mg (*T. pentaphylla* sítio urbano) e P (*C. pluviosa* sítio urbano);

5º modelo, caracterizado pelos valores mais ou menos constantes ao longo dos anos: Cu (*T. pentaphylla* sítio periurbano), Mg (*T. pentaphylla* sítio periurbano), P (*C. pluviosa* sítio periurbano), e Zn (*T. pentaphylla* sítios urbano e periurbano);

6º modelo, caracterizado por não possuir tendência definida: B (*C. pluviosa* sítio urbano), Cu (*T. pentaphylla* sítio rural), Fe (*C. pluviosa* sítio periurbano), Mg (*C. pluviosa* sítios periurbano e rural), Na (*C. pluviosa* sítios periurbano e rural e *T. pentaphylla* sítio periurbano), P (*C. pluviosa* sítio rural e *T. pentaphylla* sítios periurbano e rural), Si (*C. pluviosa* sítio periurbano e *T. pentaphylla* sítios urbano e periurbano) e Zn (*C. pluviosa* sítio urbano e *T. pentaphylla* sítio rural).

As diversas tendências evidenciam a complexidade existente nesse tipo de estudo, uma vez que as relações entre a presença dos elementos químicos no lenho variam entre as árvores das espécies e em função das características específicas dos ambientes durante o seu crescimento (PETERSON e ANDERSON, 1990).

Além disso, conforme o item 3.6 (Revisão da Literatura), os estudos que aplicam os anéis de crescimento do lenho das árvores no biomonitoramento ambiental avaliam, em sua maioria, a concentração de elementos com alto potencial tóxico como o Hg, Cr, Cd, Pb e As, relacionando-a com ambientes de comprovada contaminação e/ou sobre efeito de poluição atmosférica. Desta forma, a determinação de macro e micronutrientes nos anéis de crescimento é rara e aparece, na maioria das vezes, relacionada à ambientes sem efeito

antropogênico. Nesse contexto, o 1º modelo pode ser considerado como o mais frequente entre as 2 espécies e, desta forma, pode ser considerado como o representativo para esses elementos.

A literatura reporta tendências semelhantes encontradas para os elementos químicos Ca e K (LÉVY et al., 1996), Mn em árvores de *Quercus robur* (PENNINCKX et al., 2001) e Mg e Zn em árvores de *Fagus sylvatica* (HRISTOVSKI e MELOVSKI, 2010) crescendo na ausência de agentes poluidores.

O aumento dos valores de intensidade das linhas de emissão de Cu, Fe, Na e Zn no período de 1985-1990 (2º modelo) nas porções amostradas das árvores das 2 espécies no sítio urbano, parece estar associado ao início das atividades das industriais do setor químico localizadas no mesmo ambiente, como a Apliquim, com início em 1986, atuando na reciclagem de materiais que contém Hg, aparecendo no relatório de áreas contaminadas da CETESB pela produção e emissão atmosférica de metais; Galvani, com início em 1983, produzindo e comercializando fertilizantes, ácido sulfúrico e enxofre e outros produtos, aparece no relatório de áreas contaminadas da CETESB pelo armazenamento, descarte e emissão atmosférica de contaminantes inorgânicos e a Heringer, com início das atividades em 1986, produzindo fertilizantes básicos e especiais e fórmulas NPK, não aparecendo no relatório de áreas contaminadas da CETESB.

O aumento dos teores de Cu, Fe, Zn no lenho das árvores das 2 espécies detectado nas análises de LIBS corroboram os resultados de Witte et al. (2004) para o lenho das árvores de *Picea engelmannii* cultivadas próximas às áreas industrializadas dos EUA.

O 3º e 4º modelo de variação aparecem na literatura relacionados às alterações na química do solo (ex. diminuição do pH) em áreas poluídas (SHORTLE et al., 1995) que podem determinar a concentração dos elementos químicos nas regiões do cerne e do alburno do lenho das árvores (LÉVY et al., 1996) ou, ainda, pela reabsorção dos nutrientes na região dos primeiros anéis de crescimento no alburno (HAGEMEYER, 1993).

Na literatura são apresentados resultados evidenciando tendências similares às do presente trabalho encontrados para Mn e Al no lenho das árvores de *Abies religiosa* crescendo no México (WATMOUGH e HUTCHINSON, 1999), de Al no lenho de árvores de *Picea abies* na Alemanha (AUGUSTIN et al., 2005) e de Mg no lenho de árvores de *Pinus contorta* nos EUA (PETERSON e ANDERSON, 1990).

Valores da concentração de elementos químicos constantes ao longo do perfil radial, (5º modelo) encontrados principalmente para as árvores do sítio periurbano, foram também verificados para os elementos Cu e Zn no Canadá por Hristovski e Melovski (2010) e P por Penninckx et al. (2001), na Bélgica.

Figura 28 – Análise de componentes principais da composição química nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* nos 3 sítios do estudo

Figura 29 – Análise de componentes principais da composição química nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *C. pluviosa* nos 3 sítios do estudo

Figura 30 – Análise de componentes principais da composição química nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *T. pentaphylla* nos 3 sítios do estudo

Figura 31 – Gráfico de *loadings* da componente principal (PCA) para as amostras de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* (A), *C. pluviosa* (B) e *T. pentaphylla* (C)

Tabela 18 – Comparação entre as intensidades das linhas de emissão (u.a.) de macro e micronutrientes do lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* nos 3 sítios do estudo

Espécie	Sítio	Elemento					
		Al	B	Ca	Cu	Fe	K
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	282,18 a	121,93 a	7566,27 a	763,20 b	485,07 a	1746,48 a
	Periurbano	182,97 a	142,48 a	4532,52 a	398,44 a	949,39 a	1715,20 a
	Rural	220,25 a	122,96 a	7770,48 a	509,78 a	311,09 a	1784,19 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	212,61 a	66,02 a	5380,24 a	669,72 b	367,41 a	1139,31 a
	Periurbano	145,35 a	175,98 a	1940,06 a	355,13 a	320,37 a	1116,37 a
	Rural	173,08 a	95,37 a	5490,42 a	455,06 a	449,86 a	1329,32 a

Espécie	Sítio	Elemento					
		Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	2115,99 a	208,85 a	1984,83 b	332,53 b	478,19 a	56,59 a
	Periurbano	1316,19 a	304,52 a	1386,44 a	109,19 a	340,85 a	115,40 a
	Rural	1599,59 a	129,83 a	1575,97 a	115,79 a	315,29 a	115,36 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	1573,76 b	106,62 a	1575,14 a	158,51 a	491,60 b	45,21 ab
	Periurbano	836,76 a	154,30 a	1350,33 a	113,88 a	446,71 b	31,18 a
	Rural	1289,34 ab	161,16 a	1406,98 a	125,93 a	260,15 a	108,21 b

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

Tabela 19 – Comparação entre as intensidades das linhas de emissão (u.a.) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* nos 3 sítios do estudo

Espécie	Sítio	Porção	Elemento					
			Al	B	Ca	Cu	Fe	K
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	Inicial	351,06 a	118,73 a	11199,65 a	520,85 a	437,44 a	2633,53 a
		Intermed.	139,53 a	112,50 a	7131,28 a	886,23 a	285,60 a	1611,37 a
		Final	355,95 a	134,56 a	4367,90 a	882,52 a	732,18 a	994,54 a
	Periurbano	Inicial	288,78 a	114,38 ab	7502,10 a	468,56 a	1178,48 b	2158,37 a
		Intermed.	134,35 a	269,70 b	3656,55 a	354,89 a	1435,56 b	1938,00 a
		Final	125,79 a	43,36 a	2438,92 a	371,87 a	234,14 a	1049,24 a
	Rural	Inicial	311,84 a	231,09 a	14024,45 b	555,38 a	591,08 a	2917,27 b
		Intermed.	211,39 a	97,55 a	6982,95 ab	453,50 a	240,22 a	1738,21 ab
		Final	137,53 a	40,25 a	2304,05 a	520,47 a	101,97 a	697,10 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	Inicial	242,80 ab	100,93 a	11305,47 b	559,27 a	377,66 a	1803,98 b
		Intermed.	261,37 b	49,18 a	2997,88 a	732,69 a	597,63 a	710,85 a
		Final	133,67 a	47,95 a	1837,39 a	717,20 a	126,96 a	903,09 a
	Periurbano	Inicial	209,98 a	453,72 b	3035,83 a	343,93 a	864,59 b	1867,87 b
		Intermed.	125,81 a	37,14 a	1116,84 a	427,63 a	68,68 a	765,44 a
		Final	100,26 a	37,08 a	1667,50 a	293,84 a	27,85 a	715,81 a
	Rural	Inicial	352,73 b	206,04 b	13693,37 b	640,96 a	1173,26 b	2665,73 b
		Intermed.	73,43 a	41,35 a	1284,88 a	347,42 a	97,60 a	567,09 a
		Final	93,08 a	38,74 a	1493,03 a	376,80 a	78,71 a	755,13 a
Espécie	Sítio	Porção	Elemento					
			Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	Inicial	2042,92 a	247,26 a	1898,06 a	160,21 a	429,83 ab	71,58 a
		Intermed.	2379,90 a	90,96 a	1958,25 a	270,11 ab	219,18 a	55,78 a
		Final	1925,15 a	288,34 a	2098,18 a	567,29 b	785,56 b	42,40 a
	Periurbano	Inicial	1892,90 a	499,71 b	1490,74 a	134,95 a	454,08 a	187,18 a
		Intermed.	1145,07 a	260,85 a	1382,84 a	78,99 a	226,58 a	83,03 a
		Final	910,61 a	153,02 a	1285,73 a	113,63 a	341,87 a	75,99 a
	Rural	Inicial	2054,49 a	247,31 a	1873,03 b	126,92 a	431,66 a	267,64 b
		Intermed.	1285,34 a	123,04 a	1329,73 a	156,01 a	258,39 a	55,44 a
		Final	1458,95 a	19,14 a	1525,15 ab	64,45 a	255,82 a	22,99 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	Inicial	1464,59 a	187,80 b	1298,52 a	193,16 a	424,83 ab	60,89 a
		Intermed.	1454,32 a	105,69 ab	1716,40 a	144,99 a	662,63 b	28,64 a
		Final	1802,38 a	26,38 a	1710,51 a	137,39 a	387,35 a	46,12 a
	Periurbano	Inicial	1069,07 a	407,59 b	1332,42 a	78,84 a	348,35 a	18,61 a
		Intermed.	634,86 a	24,63 a	1305,68 a	130,09 a	399,85 a	22,05 a
		Final	806,37 a	30,68 a	1412,87 a	132,70 a	591,93 a	52,89 a
	Rural	Inicial	2283,65 b	412,75 b	2044,97 b	155,90 a	485,17 b	284,06 b
		Intermed.	555,86 a	42,43 a	1125,59 a	77,41 a	162,07 a	20,40 a
		Final	1028,51 a	28,29 a	1050,37 a	144,47 a	133,22 a	20,17 a

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

Tabela 20 – Matriz de correlação entre as variáveis ano e largura do anel de crescimento e elementos químicos presentes no lenho das árvores de *C. pluviosa* nos 3 sítios do estudo

<i>Caesalpinia pluviosa</i>															
Variável	Sítio	Ano	Largura	Al	B	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
Ano	Urbano	.	-0,056	-0,055	0,080	-0,466**	0,291*	0,136	-0,589**	0,072	0,084	0,171	0,396**	0,250	-0,195
	Periurbano	.	-0,059	-0,596**	-0,160	-0,716**	-0,296*	-0,386**	-0,524**	-0,554**	-0,763**	-0,259*	-0,089	-0,077	-0,479**
	Rural	.	-0,270	-0,472**	-0,603**	-0,599**	-0,095	-0,616**	-0,566**	-0,216	-0,603**	-0,348*	-0,112	-0,361*	-0,658**
Largura	Urbano	.	.	-0,089	-0,194	0,166	0,206	-0,174	0,216	0,138	-0,166	0,114	-0,247	-0,098	0,013
	Periurbano	.	.	0,111	0,210	-0,012	0,130	-0,021	-0,093	-0,065	0,035	0,038	0,202	0,187	0,110
	Rural	.	.	0,008	0,151	0,253	-0,088	0,131	0,170	0,038	0,279	-0,013	0,152	0,056	0,111
Al	Urbano	.	.	.	0,469**	0,053	-0,029	0,843**	-0,121	-0,120	0,663**	0,211	0,142	0,895**	0,343*
	Periurbano	.	.	.	-0,100	0,720**	0,502**	0,285*	0,281*	0,474**	0,664**	0,210	0,363**	0,684**	0,765**
	Rural	.	.	.	0,679**	0,738**	0,258	0,791**	0,603**	0,607**	0,658**	0,556**	0,162	0,826**	0,606**
B	Urbano	.	.	.	.	0,451**	-0,031	0,553**	0,123	0,366*	0,685**	-0,076	0,587**	0,360*	0,364*
	Periurbano	.	.	.	.	0,025	-0,126	0,181	0,255*	0,040	0,036	0,362**	-0,200	-0,180	-0,073
	Rural	.	.	.	.	0,923**	0,269	0,708**	0,834**	0,756**	0,563**	0,586**	-0,201	0,469**	0,778**
Ca	Urbano	.	.	.	.	.	-0,252	0,046	0,705**	0,476**	0,279	-0,277	-0,055	-0,167	0,600**
	Periurbano	.	.	.	.	.	0,482**	0,326**	0,485**	0,695**	0,729**	0,154	0,133	0,344**	0,738**
	Rural	.	.	.	.	.	0,375**	0,775**	0,781**	0,744**	0,707**	0,528**	0,020	0,565**	0,830**
Cu	Urbano	.	.	.	.	.	.	0,100	-0,438**	0,042	0,000	0,615**	0,125	0,087	-0,045
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	0,038	0,022	0,159	0,349**	-0,008	0,395**	0,337**	0,547**
	Rural	.	.	.	.	.	.	0,336*	0,183	0,168	0,354*	0,286*	0,227	0,239	0,393**
Fe	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	-0,168	-0,042	0,615**	0,308*	0,160	0,890**	0,506**
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	0,378**	0,246*	0,338**	0,108	-0,114	0,041	0,280*
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	0,451**	0,521**	0,745**	0,411**	0,273	0,735**	0,752**
K	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	0,290*	-0,077	-0,163	-0,364*	-0,299*	0,391**
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	0,747**	0,434**	0,593**	-0,464**	-0,246*	0,100
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	0,685**	0,319*	0,618**	-0,309*	0,317*	0,531**
Mg	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,273	-0,007	0,381**	-0,257	0,463**
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,736**	0,563**	-0,110	0,035	0,373**
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,355*	0,473**	-0,190	0,477**	0,536**
Mn	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,146	0,587**	0,552**	0,314*
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,403**	0,253*	0,197	0,646**
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,224	0,621**	0,598**	0,693**
Na	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-0,025	0,321*	0,003
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-0,115	-0,108	0,001
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	-0,324*	0,423**	0,521**
P	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,092	-0,134
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,478**	0,505**
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,226	0,048
Si	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,288*
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,591**
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	0,584**
Zn	Urbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Periurbano	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	Rural	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

** Correlações significativas ao nível 0,01

* Correlações significativas ao nível 0,05

Tabela 21 – Matriz de correlação entre as variáveis ano e largura do anel de crescimento e elementos químicos presentes no lenho das árvores de *T. pentaphylla*

<i>Tabebuia pentaphylla</i>															
Variável	Sítio	Ano	Largura	Al	B	Ca	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	P	Si	Zn
Ano	Urbano	.	-0,180	-0,327**	-0,449**	-0,749**	0,107	-0,186	-0,581**	0,169	-0,570**	0,390**	0,018	-0,079	-0,239*
	Periurbano	.	0,234*	-0,236*	-0,264*	-0,403**	-0,066	-0,526**	-0,556**	-0,218	-0,728**	0,268*	0,064	0,273*	0,418**
	Rural	.	0,146	-0,648**	-0,734**	-0,751**	-0,451**	-0,666**	-0,638**	-0,516**	-0,703**	-0,691**	0,051	-0,676**	-0,660**
Largura	Urbano	.		-0,009	-0,039	0,140	-0,183	-0,190	0,091	-0,123	0,153	-0,177	-0,029	-0,020	0,185
	Periurbano	.		-0,105	-0,073	-0,160	0,124	-0,158	-0,172	-0,009	-0,286*	0,059	0,127	-0,051	-0,092
	Rural	.		-0,219	-0,185	-0,192	-0,146	-0,088	-0,204	-0,138	-0,128	-0,166	-0,106	-0,165	-0,065
Al	Urbano	.			0,188	0,307**	0,089	0,633**	-0,060	-0,029	0,513**	-0,055	0,258*	0,834**	0,136
	Periurbano	.			0,774**	0,264*	0,118	0,582**	0,153	0,103	0,350**	0,201	0,078	0,632**	-0,112
	Rural	.			0,813**	0,884**	0,769**	0,761**	0,602**	0,701**	0,818**	0,700**	0,426**	0,850**	0,695**
B	Urbano	.				0,607**	0,095	0,227	0,488**	0,089	0,388**	-0,207	-0,085	0,065	0,480**
	Periurbano	.				0,340**	-0,079	0,698**	0,359**	0,106	0,393**	0,217	-0,195	0,569**	-0,078
	Rural	.				0,947**	0,629**	0,636**	0,755**	0,773**	0,891**	0,740**	0,159	0,731**	0,767**
Ca	Urbano	.					-0,128	0,074	0,532**	0,092	0,696**	-0,438**	0,272*	-0,057	0,442**
	Periurbano	.					-0,172	0,510**	0,748**	0,637**	0,679**	-0,038	-0,033	-0,065	-0,023
	Rural	.					0,686**	0,705**	0,741**	0,778**	0,903**	0,739**	0,247*	0,808**	0,843**
Cu	Urbano	.						0,188	-0,099	-0,064	-0,069	0,575**	-0,097	0,183	-0,091
	Periurbano	.						-0,051	-0,234*	-0,153	0,046	0,143	0,264*	-0,148	-0,137
	Rural	.						0,609**	0,473**	0,542**	0,691**	0,512**	0,468**	0,621**	0,586**
Fe	Urbano	.							-0,133	-0,051	0,343**	0,085	0,207	0,605**	-0,016
	Periurbano	.							0,456**	0,054	0,738**	0,242*	-0,122	0,155	-0,201
	Rural	.							0,496**	0,562**	0,722**	0,740**	0,124	0,812**	0,679**
K	Urbano	.								0,222	0,128	-0,141	-0,275*	-0,234*	0,216
	Periurbano	.								0,627**	0,596**	0,077	-0,279*	-0,143	-0,105
	Rural	.								0,806**	0,545**	0,829**	-0,120	0,458**	0,481**
Mg	Urbano	.									0,013	0,213	0,362**	-0,115	0,118
	Periurbano	.									0,269*	0,017	0,292*	0,009	0,123
	Rural	.									0,660**	0,728**	0,257*	0,510**	0,563**
Mn	Urbano	.										-0,276*	0,514**	0,263*	0,362**
	Periurbano	.										-0,068	-0,084	-0,180	-0,290*
	Rural	.										0,626**	0,348**	0,780**	0,869**
Na	Urbano	.											-0,105	0,080	-0,229
	Periurbano	.											0,001	0,317**	0,293*
	Rural	.											-0,089	0,616**	0,494**
P	Urbano	.												0,063	0,153
	Periurbano	.												0,138	0,168
	Rural	.												0,257*	0,256*
Si	Urbano	.													0,050
	Periurbano	.													0,416**
	Rural	.													0,775**
Zn	Urbano	.													.
	Periurbano	.													.
	Rural	.													.

** Correlações significativas ao nível 0,01

* Correlações significativas ao nível 0,05

Figura 32 – Variação temporal da intensidade das linhas de emissão (u.a) de Al, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg e Mn nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *C. pluviosa*, nos 3 sítios do estudo

Figura 33 - Variação temporal da intensidade das linhas de emissão (u.a) de Na, P, Si e Zn nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *C. pluviosa*, nos 3 sítios do estudo

Figura 34 – Variação temporal da intensidade das linhas de emissão (u.a) de Al, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg e Mn nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *T. pentaphylla*, nos 3 sítios do estudo

Figura 35 - Variação temporal da intensidade das linhas de emissão (u.a) de Na, P, Si e Zn nos anéis de crescimento do lenho das árvores de *T. pentaphylla*, nos 3 sítios do estudo

5.9 Concentração de macro e micronutrientes e de elementos potencialmente tóxicos no lenho das árvores: ICP OES

A aplicação da técnica de ICP OES possibilitou a determinação da concentração total dos macro e micronutrientes e de elementos químicos potencialmente tóxicos (não detectados através da análise via LIBS) no lenho das árvores das 2 espécies para estabelecer os valores de referência nos 3 ambientes distintos.

Os resultados da análise do lenho das árvores das 2 espécies, nos 3 sítios (Tabela 24), expressos em $\mu\text{g/g}$ (ppm), indicam diferenças significativas para as árvores de *C. pluviosa*, para as médias das concentrações obtidas nos 3 sítios para 7 dos 17 elementos químicos determinados, sendo: Ca, P, Mg (macronutrientes), Fe, Mn e Zn (micronutrientes) e Pb. Para as árvores de *T. pentaphylla*, a exceção do macronutriente K e dos micronutrientes Ni e Zn e de Cd, detectaram-se diferenças significativas entre pelo menos um dos sítios de estudo (total de 13 elementos).

Embora os resultados da análise considerem diferentes períodos de crescimento radial (idades) do tronco das árvores das 2 espécies, é possível detectar que o acúmulo dos

elementos químicos varia entre as espécies e entre os sítios analisados. A análise da comparação de médias (Tabela 25), referente às amostras do lenho das árvores utilizadas na análise via ICP OES (vide item 4.10.2), demonstra que não existem diferenças significativas no incremento acumulado (IA) das árvores dos 3 sítios para as duas espécies e entre o número de anéis de crescimento (anos) para as árvores de *C. pluviosa*. Para as árvores de *T. pentaphylla*, os sítios urbano e rural diferiram significativamente quanto ao número de anéis de crescimento em relação ao periurbano, de menor valor, indicando que os resultados do acúmulo dos elementos químicos no lenho das árvores nos 2 sítios pode ter sido influenciados pela idade das plantas. Essa constatação é importante considerando que as árvores jovens tendem a absorver, acumular e mobilizar grande quantidade de elementos químicos, enquanto as árvores maduras dependem muito mais da ciclagem bioquímica para a manutenção do crescimento. Ainda, a absorção radicular dos elementos químicos é relevante para a acumulação no lenho das plantas jovens, enquanto na fase adulta, o cerne passa a ser uma das principais fontes de elementos químicos deslocados para as folhas, fato que pode justificar as variações nas concentrações do lenho, de acordo com Prichett e Fisher (1987).

No lenho das árvores de *C. pluviosa* localizadas no sítio urbano foram encontradas maiores concentrações de Ca, Fe, Mn, P, Zn (diferenças significativas) e Al, Cd, Cr e Si (não significativas) em relação aos demais sítios. Para as árvores de *T. pentaphylla* foi observada essa mesma tendência para Al, B, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, P (diferenças significativas) e Cd (não significativas).

Dos elementos químicos citados o Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn e Zn podem estar relacionados com o tráfego veicular (LASCHOBBER et al., 2004; SILVA, 2007; MAHER et al., 2008; MARTINS, 2009; LAH, 2012), enquanto os elementos associados a atividades industriais são Co, Cr, Cu e Zn (MICHELAZO, 2003; MOREIRA, 2007).

Esses elementos químicos foram, da mesma forma, aplicados em inúmeros estudos que empregam os anéis de crescimento do lenho das árvores no monitoramento ambiental de áreas com histórico de poluição e/ou de comprovada influência de atividades antrópicas, apresentando similaridades e diferenças nas concentrações em relação às obtidas no presente estudo. Por exemplo, a concentração de Cd, Mn, P, Zn e Pb (mg.kg^{-1}) no lenho dos anéis de crescimento de árvores de *Firmiana simplex* e de *Toona sinensis* (LIU et al., 2009) de 0,17 para Cd, 6,3 para Mn, 430 para P, 8 para Zn e 3 para Pb, estão acima dos detectados no lenho das árvores das 2 espécies, no presente estudo. Por outro lado, valores próximos (mg.kg^{-1})

foram encontrados no lenho de árvores de *Betula pendula*, na Eslovênia, para Cd (0,15), Cr (0,10), Ni (0,10), Pb (1,5) e Zn (14) (LAH, 2010).

Ainda, os valores obtidos no lenho das árvores das espécies ocorrente na região industrializada do município de Paulínia (sítio urbano) se enquadram na variação dos teores (mg/kg) de Ni (0,1-3,50), Cr (0,1-2,50), Cu (0,25-3,00), Mn (10- 160), Zn (2-75) e Pb (0,05-3,50) verificados no lenho de árvores de *Pinus sylvestris* e *Betula pendula* por Butkus e Baltrėnaitė (2007) em uma região industrializada e de intenso tráfego veicular na Lituânia.

A análise comparativa do acúmulo dos elementos químicos no lenho das árvores das 2 espécies, considerando os mesmos sítios (Tabela 26) indica que as árvores de *C. pluviosa* acumularam Al, Ca, Cd, K e Pb em maiores concentrações, enquanto as árvores de *T. pentaphylla* acumularam Cu, Mg, P, Si e Zn.

Corroborando as diferenças detectadas na absorção e fixação de elementos químicos no lenho das árvores das 2 espécies no presente estudo, desenvolvendo-se em condições edafo-climáticas semelhantes, podem ser mencionados inúmeros trabalhos, como os realizados por Günthardt-Goerg e Vollenweider (2002), LeDuc e Terry (2005), França (2006) e Mihucz et al. (2008).

A comparação dos resultados (Tabela 25) com da análise do solo (Tabelas 8 e 9; item 5.2) considerando os elementos químicos Al, B, Ca, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P e Zn, determinados nas 2 análises, evidencia similaridades nos padrões de variação das concentrações de alguns elementos no lenho das árvores das 2 espécies, nos 3 sítios.

No lenho das árvores de *C. pluviosa*, as concentrações de Ca e P são proporcionais às disponíveis no solo; para as árvores de *T. pentaphylla* essa associação é verificada para B, Ca, K e P. Dos elementos químicos mencionados, 3 são macronutrientes e aparecem em grandes quantidades no solo, enquanto, somente o B representa os micronutrientes.

No entanto, os resultados da análise de solo referem-se aos teores de elementos químicos fitodisponíveis e não os totais e, ainda, considerando o período da coleta (2012), entende-se que a simples identificação dos padrões não deve ser aplicada para explicar o teor de elementos do lenho das árvores, considerando que as características físico-químicas do solo podem ter se alterado ao longo do período de crescimento das árvores. Como exemplo, pode-se citar as possíveis alterações no pH dos solos, comuns nos processos de urbanização e de industrialização pela deposição atmosférica, podendo influenciar diretamente em uma maior ou menor disponibilidade no solo e/ou absorção pelas plantas de elementos, como Al

(MARSCHNER, 1991), Pb, Cd e Zn (WATMOUGH e HUTCHINSON, 1999), Zn (STRAIT e STUMM, 1993), Ca e Mn (WATMOUGH et al., 1999).

Destaca-se, ainda, a necessidade de uma análise mais aprofundada considerando-se a complexa interação dos elementos químicos no meio e que pode influenciar na taxa de absorção e fixação no lenho das plantas, como, por exemplo, a maior absorção de K na presença de Ca, a interferência negativa do Al na fixação de Ca, a inibição da absorção de Mg na presença de altas concentrações de Ca e K, a competição entre Cu e o Zn no processo de absorção, a influência positiva do K, Ca e Mg na absorção de Fe, entre outras (MALAVOLTA, 1997).

Tabela 24 – Concentrações ($\mu\text{g/g}$) de macro e micronutrientes e de elementos potencialmente tóxicos no lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T.pentaphylla* nos 3 sítios do estudo

Espécie	Sítio	Elemento								
		Al	B	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	3,741 a	2,428 a	3939,713 b	0,198 a	0,079 a	0,178 a	1,833 a	20,569 b	4909,530 a
	Periurbano	3,339 a	2,754 a	1614,623 a	0,066 a	0,082 a	0,044 a	1,933 a	35,087 c	4689,113 a
	Rural	1,828 a	2,945 a	2144,956 a	0,020 a	0,069 a	0,000 a	2,244 a	7,775 a	6008,913 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	1,019 b	2,963 b	871,664 b	0,050 a	0,501 c	0,275 b	6,673 c	31,298 c	884,508 a
	Periurbano	0,000 a	2,164 a	749,223 a	0,012 a	0,017 a	0,079 a	2,918 a	20,138 a	1046,209 a
	Rural	0,000 a	2,447 ab	1103,990 c	0,018 a	0,053 b	0,070 a	4,390 b	27,022 b	934,779 a

Espécie	Sítio	Elemento							
		Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Si	Zn
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	119,463 a	2,737 b	21,995 a	0,049 a	88,916 c	0,434 a	18,728 a	4,511 c
	Periurbano	143,315 b	4,344 c	12,850 a	0,063 a	49,031 a	0,929 b	14,322 a	3,755 b
	Rural	114,523 a	2,153 a	35,618 a	0,073 a	58,212 b	2,094 c	15,355 a	2,909 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	265,703 c	4,779 c	83,887 b	0,267 a	215,855 c	0,132 a	19,426 b	5,584 a
	Periurbano	203,406 a	1,552 a	35,679 a	2,049 a	178,940 b	0,514 b	15,754 a	7,049 a
	Rural	235,754 b	2,041 b	31,056 a	0,115 a	171,604 a	0,167 a	19,526 b	7,596 a

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

Tabela 25 – Incrementos acumulado e número de anéis do lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* analisadas através de ICP OES

Espécie	Sítio	I.A (mm)	Nº de anéis
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	184,65 a	46 a
	Periurbano	147,65 a	23 a
	Rural	128,40 a	31 a
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	119,97 a	32 b
	Periurbano	112,64 a	14 a
	Rural	119,52 a	26 b

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

Tabela 26 – Comparação entre as concentrações ($\mu\text{g/g}$) de macro e micronutrientes e de elementos potencialmente tóxicos no lenho das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla* nos 3 sítios do estudo

Sítio	Espécie	Elemento								
		Al	B	Ca	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	K
Urbano	<i>C. pluviosa</i>	3,741 b	2,428 a	3939,713 b	0,198 a	0,079 a	0,178 a	1,833 a	20,569 a	4909,530 b
	<i>T. pentaphylla</i>	1,019 a	2,963 a	871,664 a	0,050 a	0,501 b	0,275 a	6,673 b	31,298 b	884,508 a
Periurbano	<i>C. pluviosa</i>	3,339 b	2,754 b	1614,623 b	0,066 a	0,082 a	0,044 a	1,933 a	35,087 b	4689,113 b
	<i>T. pentaphylla</i>	0,000 a	2,164 a	749,223 a	0,012 a	0,017 a	0,079 a	2,918 b	20,138 a	1046,209 a
Rural	<i>C. pluviosa</i>	1,828 b	2,945 a	2144,956 b	0,020 a	0,069 a	0,000 a	2,244 a	7,775 a	6008,913 b
	<i>T. pentaphylla</i>	0,000 a	2,447 a	1103,990 a	0,018 a	0,053 a	0,070 a	4,390 b	27,022 b	934,779 a

Sítio	Espécie	Elemento							
		Mg	Mn	Na	Ni	P	Pb	Si	Zn
Urbano	<i>C. pluviosa</i>	119,463 a	2,737 a	21,995 a	0,049 a	88,916 a	0,434 b	18,728 a	4,511 a
	<i>T. pentaphylla</i>	265,703 b	4,779 b	83,887 b	0,267 a	215,855 b	0,132 a	19,426 a	5,584 a
Periurbano	<i>C. pluviosa</i>	143,315 a	4,344 b	12,850 a	0,063 a	49,031 a	0,929 b	14,322 a	3,755 a
	<i>T. pentaphylla</i>	203,406 b	1,552 a	35,679 b	2,049 b	178,940 b	0,514 a	15,754 a	7,049 b
Rural	<i>C. pluviosa</i>	114,523 a	2,153 a	35,618 a	0,073 a	58,212 a	2,094 b	15,355 a	2,909 a
	<i>T. pentaphylla</i>	235,754 b	2,041 a	31,056 a	0,115 a	171,604 b	0,167 a	19,526 b	7,596 b

Médias seguidas de letras diferentes, em uma mesma coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey em um nível α 0,05

6 CONCLUSÕES/CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente trabalho permitem concluir que:

1. a **anatomia do lenho**, através da análise dos anéis de crescimento, permite a sua caracterização anatômica e a sua identificação, demarcação e determinação da idade das árvores das 2 espécies;
2. a **densitometria de raios X**, através dos perfis radiais de densidade aparente evidencia as variações da estrutura anatômica do lenho e com as imagens da sua seção transversal propicia uma demarcação do limite dos anéis de crescimento das árvores das 2 espécies;
3. a **dendrocronologia**, através da técnica de datação cruzada, possibilitou a identificação dos anéis de crescimento falsos e ausentes no lenho e a construção de séries médias de índices de largura dos anéis de crescimento, para as árvores das 2 espécies;
4. a análise das séries temporais de largura de anéis de crescimento demonstram que as árvores das 2 espécies apresentam crescimento radial sincrônico, em resposta às características específicas dos 3 sítios de estudo;
5. a análise de correlação da largura dos anéis de crescimento das árvores de cada sítio indicou ausência de crescimento radial sincrônico do tronco, em função da influência das características específicas de cada sítio nas árvores das 2 espécies;
6. a **dendroclimatologia**, através da análise dos anéis de crescimento, mostrou, para o sítio rural, que as variáveis climáticas induzem estímulo e redução do crescimento radial do tronco das árvores das 2 espécies;
7. a **dendroclimatologia**, indicou para os sítios urbano e periurbano que as alterações no padrão de resposta climática evidenciam a influência de fatores não climáticos – como estresse, fontes de poluição, etc. - no ritmo de crescimento anual das árvores das 2 espécies;
8. os incrementos acumulado e médio anual do tronco das árvores das 2 espécies, em período comum de crescimento, permitem identificar o grau de interferência induzido pelas características de cada sítio;
9. a **dendroquímica**, pela aplicação da técnica analítica LIBS, constitui-se em ferramenta prática e eficiente na detecção de macro e micronutrientes e de elementos com potencial tóxico nos anéis de crescimento do lenho de árvores das 2 espécies;

10. a análise de PCA da intensidade das linhas de emissão indicou o grau de similaridade na composição química dos anéis de crescimento, passíveis de serem agrupados e indicando os elementos de maior variabilidade no lenho das árvores das 2 espécies;
11. a avaliação dos valores de intensidade das linhas de emissão dos analitos identificou padrões temporais de fixação de elementos químicos no lenho, com tendência comum para alguns, nos sítios de menor influência antrópica. No sítio urbano, determinou-se o período de maior absorção de elementos com potencial tóxico (Al, B, Cu, Fe e Na) no lenho, relacionado com o início das atividades industriais para as árvores das 2 espécies;
12. a **dendroquímica**, pela aplicação da técnica ICP OES, detectou o teor de elementos químicos nos anéis de crescimento permitindo (i) estabelecer valores de referência para ambientes distintos, (ii) determinar elementos de alto potencial tóxico (Cd, Co, Cr, Ni e Pb), (iii) identificar tendência de acúmulo de elementos químicos e (iv) comparar com o monitoramento ambiental de outras áreas com histórico de poluição atmosférica;
13. a **dendroecologia**, pelo estudo dos anéis de crescimento, propicia informações da qualidade do ambiente, recomendada para estudos de monitoramento ambiental, de saúde pública, etc., aplicando a análise dos anéis de crescimento do lenho das espécies de árvores de arborização urbana, como as de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*.

7 RECOMENDAÇÕES

Como recomendações são apresentadas sugestões para futuras pesquisas em anatomia do lenho, dendrocronologia e seus ramos, como a dendroclimatologia, dendroecologia, dendroquímica, etc., fundamentadas nas metodologias aplicadas e os resultados obtidos no presente estudo. As recomendações são direcionadas para as análises das árvores das 2 espécies nos 3 sítios de estudo, bem como a ampliação dos estudos de monitoramento ambiental e de saúde pública nos ambientes urbanos, periurbanos e rurais das cidades brasileiras afetadas pelo desenvolvimento industrial, tráfego veicular, poluição (ar, da água, do solo), atividades de aterros sanitários, mineração, de siderúrgicas, metalúrgicas, indústrias químicas, etc. São elas:

- a avaliação comparativa da estrutura anatômica microscópica e da ultra-estrutura do lenho das árvores, na identificação de possíveis efeitos da poluição atmosférica e como subsídio para o entendimento das variações das suas taxas de crescimento;
- a avaliação da atividade cambial e da fenologia das árvores das espécies visando uma maior compreensão da periodicidade da formação dos anéis de crescimento e das relações entre o crescimento das árvores, dos fatores climáticos, da senescência e queda das árvores, principalmente, nas áreas urbanas das metrópoles;
- a aplicação da análise de isótopos de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) para a geração de informações da relação entre a condutância estomática (trocas gasosas) nas árvores e as condições atmosféricas ao longo do tempo, cujos resultados podem auxiliar no entendimento das variações do crescimento entre as árvores em sítios urbano, periurbano e rural;
- a quantificação dos teores dos analitos nos anéis de crescimento do lenho, pela metodologia semi-quantitativa via LIBS, permitindo a compreensão do seu acúmulo no lenho, bem como a disponibilidade desses elementos no ambiente – solo, água, atmosfera - em que as árvores se desenvolvem;
- aplicação de outras importantes técnicas analíticas, como a espectrometria de massa com fonte de plasma acoplado a um sistema com ablação a laser (LA-ICP-MS) e a fluorescência de raios X (XRF), na determinação, principalmente, de elementos com alto potencial tóxico (Pb, Cd, As, etc.) presentes em baixos teores nos anéis de crescimento do lenho das árvores e sua comparação com a técnica LIBS.

REFERÊNCIAS

ALLOWAY, B.J.; AYERS, D.C. **Chemical principles of environmental pollution**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 1996. 395p.

AMARAL, A.C.B.; TOMAZELLO FILHO, M. Avaliação das características dos anéis de crescimento de *Pinus taeda* pela técnica de microdensitometria de raios X. **Revista de Ciência e Tecnologia**, Piracicaba, v. 6, n. 11/12, p.17-23, 1998.

AMATO, I. Tapping tree rings for the environmental tales they tell. **Analytical Chemistry**, Washington, v.60, p. 1103–1107, 1988.

AMORIM, W.B. **Monitoramento da concentração e caracterização do material particulado suspenso na atmosfera**. 2004. 180p. Tese (Doutorado na área de Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190**: determinação da massa específica básica da madeira. Rio de Janeiro, 1997.

ATKINSON, R.W.; ANDERSON, H.R.; SUNYER, J.; AYRES, J.; BACCINI, M.; VONK, J.M.. Acute effects of particulate air pollution on respiratory admission: results from APHEA 2 project. Air pollution and health: a European Approach. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, New York, v. 164, p. 1860-1866, 2001.

AUGUSTIN S., STEPHANOWITZ H., WOLFF B., SCHRODER J., HOFFMANN E., Manganese in tree rings of Norway spruce as an indicator for soil chemical changes in the past. **European Journal of Forest Research**, Oxford, v.124, p. 313-318, 2005.

BAES, C.F.; MCLAUGHLIN, S.B. Trace elements in tree rings: Evidence of recent and historical air pollution. **Science**, Washington, v.224, n.4648, p.494–497.1984.

BAKER A.J.M. Accumulators and excluders - strategies in the response of plants to heavy metals. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia v. 3, p.643-654, 1981.

BANDAK, B. **Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) for Elemental Analysis of Barium and Strontium in Tree Rings as a Method of Environmental Monitoring**. 2011. 65p. Dissertação (Master of Arts in Clinical Chemistry) - University of Scranton, Pennsylvania, 2011.

BARBIN, H.S. **Estudo das transformações na conformação dos maciços arbóreo/arbustivos do Parque da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**. 1999. 94p. Dissertação Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

BARCELÓ, J.; POSCHENRIEDER, Ch. Structural and ultrastructural changes in heavy metal exposed plants. In: PRASAD, M.N.V; HAGEMEYER, J. (Ed.). **Heavy metal stress in plants: from molecules to ecosystems**. Berlin: Springer, 1999. p. 183–206.

BARNES, D.; HAMADAH, M.A.; OTTAWAY, J.M. The lead, copper and zinc content of tree rings and bark: a measurement of local metallic pollution. **Science Total Environmental**, Amsterdam. v. 5, p. 63–67, 1976

BELLIS, D.J. et al. Evaluation of the historical records of lead pollution in the annual growth rings and bark pockets of a 250-year-old *Quercus crispula* in Nikko, Japan. **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 295, p. 91-100, 2002.

BERLIZOV, A.N.; BLUM, O.B.; FILBY, R.H.; MALYUK, I.A.; TRYSHYN, V.V. Black poplar-tree (*Populus nigra* L.) bark as an alternative indicator of urban air pollution by chemical elements. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest v.276, p. 15-21, 2008.

BRAGA, A.L.F.; CONCEIÇÃO, G.M.S.; PEREIRA, L.A.A.; KISHI, H.S.; PEREIRA, J.C.R.; ANDRADE, M.F.. Air pollution and pediatric respiratory hospital admissions in São Paulo, Brazil. **Journal of Environmental Medicine**, Chichester v.1, p. 95- 102, 1999.

BRAKEL, J.A.; VAN DEN VISSER, H. The influence of environmental conditions on tree-ring series of Norway spruce for different canopy and vitality classes. **Forest Science**, Bethesda., v. 42, p. 206–219, 1996.

BRASIL. Lei n.º 6.983 de 31/08/1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências. Diário Oficial da União de 02/09/1981. Disponível em: <<http://www.gov.br/port/CONAMA/index.cfm>>. Acesso em :06 abr. 2012.

BORTOLUZZI, R.L.C.; MIOTTO, S.T.S.; BIONDO, E.; SCHIFFINO-WITTMANN, M.T. **Estudos orfológicos, citotaxonômicos e moleculares no grupo *Caesalpinia* l. Sensu amplo: *Caesalpinia*, *Hoffmanseggia* e *Pomaria* no sul da América do Sul**. Lages 2007. 57p. Relatório de Projeto de Revisão Bibliográfica.

BRABANDER D.J., KEON, N., STANLEY R.H., HEMOND H.F. Intra ring variability of Cr, As, Cd and Pb in red oak revealed by secondary ion mass spectrometry: Implications for environmental biomonitoring. **PNAS**, v.96, n.25, p.14635-14640, 1999.

BRÄUNING, A.; VOLLAND-VOIGT, F.; BURCHARDT, I.; GANZHI, O.; NAUß, T.; PETERS, T. **Erdkunde** , v. 63, n. 4, p. 337-345, 2009.

BRIENEN, R.J.W.; ZUIDEMA, P.A. Relating tree growth to rainfall in Bolivian rain forests: a test for six species using tree ring analysis. **Oecologia**, Berlin, v.146, p.1–12, 2005.

BROWN, P.M. **Introduction to dendrochronology lecture 1**: Basic terminology and concepts. Tucson: Rocky Mountain Tree-ring Research, p. 21. 2003.

BUKATA, A.R.; KYSER, T.K. Tree-ring elemental concentrations in oak do not necessarily passively record changes in bioavailability. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.390, n.1, p.275-86, 2008.

BUTKUS, D.; BALTRENAITE, E. Transport of heavy metals from soil to *Pinus sylvestris* L. and *Betula pendula* Roth. trees, **Ekologija**, Vilnius v.53, n.1, p.29-36, 2007.

CALLADO, C.H.; SILVA NETO, S.J.; SCARANO, F.R.; COSTA, C.G.. Periodicity of growth rings in some flood-prone trees of the Atlantic Rain Forest in Rio de Janeiro, Brazil. **Trees**, Santa Monica, v. 15, p.492–497. 2001.

CALLADO, C.H.; SILVA NETO, S.J.; SCARANO, F.S.; COSTA, C.G. Radial growth dynamics of *Tabebuia umbellata* (Bignoniaceae), a flood-tolerant tree from the Atlantic Forest swamps in Brazil. **IAWA Journal**, Utrecht, v.25, n.2, p.175-183, 2004.

CARNEIRO, R.M.A. **Bioindicadores vegetais de poluição atmosférica: uma contribuição para a saúde da comunidade**. 2004. 46p. Dissertação (Área de concentração: Enfermagem em Saúde Pública) - Escola de Enfermagem de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2004.

CARRERAS, H.A.; PIGNATA, M.L. Biomonitoring of heavy metals and air quality in Cordoba city, Argentina, using transplanted lichens. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 117, p. 77-87. 2002.

CARRERAS, H.A.; PIGNATA, M.L.; SALDIVA, P.H.N. In situ monitoring of urban air in Córdoba, Argentina using the *Tradescantia-micronucleus* (Trad-MCN) bioassay. **Atmospheric Environmen, Hoboken**, v. 40, p. 7824-7830, 2006.

CARVALHO, G.G.A. **Efeito da fluência na análise de pastilhas de materiais vegetais por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser**. 2011. 117p. Dissertação (Mestrado em Química na Agricultura e no Ambiente) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

CEPAGRI, **Clima dos Municípios Paulistas**. Disponível em:<<http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>>. Acesso em:06 jun. 2012.

CETESB. **Caracterização das estações de monitoramento de fumaça no interior do Estado de São Paulo Estação do Município de Paulínia**.(Secretaria de Estado do Meio Ambiente, ISSN 0103-4103). 2006. 22p.

CETESB, **Relatório do ar no Estado de São Paulo 2008** [recurso eletrônico]. (Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente, ISSN 0103-4103). 2008. 340p.

CETESB. **Relatório do ar no Estado de São Paulo 2011**. Série Relatórios/ Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo, 2011. 340p.

CHAGAS, M.P. **Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP.** Piracicaba, 2009. 114p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CHAGAS, M.P. ; GONZALEZ, A.V. ; RADAELI NETO, A.P. ; SA, P. A. ; LISI, C. S. ; TOMAZELLO FILHO, M. . Relationship between climate and tree-rings of *Tectona grandis* trees in natural and urban environment of Piracicaba, State of Sao Paulo, Brazil. In: IAWA PAN-AMERICAN MEETING ANNALS, , 2012. Recife. **Anais...** Recife: IAWA, 2012. v.1, p.63.

CHEN, Z.; HE, X; CUI, M.; DAVI, N.; ZHANG, X.; CHEN, W.; SUN, Y. The effect of anthropogenic activities on the reduction of urban tree sensitivity to climatic change: dendrochronological evidence from Chinese pine in Shenyang city. **Trees**, Santa Monica, v. 25, p. 393-495. 2011.

CHIMENT, V.J.; CHIMENT, J.J. Analytic bibliography of basic and applied dendrochemistry. **Simple Interest** 1, 2005. , v.1, p.11-28.

CLEMENTE, D.A. **Estudo do impacto ambiental das fontes industriais de poluição do ar no município de Paulínia – SP empregando o modelo ISCST3.** 2000. 189p. Campinas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) . Faculdade de Engenharia Química.Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

CONCEIÇÃO, G.M.S.; MIRAGLIA, S.G.E.K.; KISHI, H.S.; SALDIVA, P.H.N.; SINGER, J.M. Air pollution and child mortality: a time-series study in São Paulo, Brazil. **Environmental Health Perspectives**, Philadelphia v. 109, n.3, p. 347-350, 2001.

CONTI, M.E.; CECCHETHI, G. Biological monitoring: lichens as bioindicators pf air pollution assessment – a review. **Environmental Pollution**, Amherst, v.114, n.3, p.471- 492, 2001.

COOK, E.R. A conceptual linear aggregate model for tree rings. In: COOK, E.R.; KARIUSTUS, A. (Ed.). **Mehtods of dendrochronology:** applications in the environmental sciences. Dordrecht: Kluwer Academic. 1989. p. 102-103.

COOK, E.R; HOLMES, R.L. **Users manual for program ARSTAN.** Palisades: Lamont-Doherty Earth Observatory, 1986. 28p.

CORDEIRO, J.R.; MARTINEZ, M.I.V, LIA, R.W.C, CARDOSO, A.P, NUNES, L.C; KRUG F.J.; PAIXÃO, T.R.L.C; NOMURA, C.S; GRUBER, J. Identification of four wood species by an electronic nose and by LIBS. **International Journal of Electrochemistry**, New York, v.2012, p.1-5, 2012.

CUTTER, B.E.; GUYETTE, R.P. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 22, p.611–619, Jan-Mar. 1993.

DE PERNÍA, N.E.; MELANDRI, J.L. **Anatomia de la madera de 68 especies de la sub-familia Caesalpinioideae (Leguminosae) en Venezuela**. Mérida-Venezuela:Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT), 2006. 191p.

DE TEMMERMAN, L.; BELL, J.N.B., GARREC, J.P.; KLUMPP, A.; KRAUSE, G.H.M.; TONNEIJCK, A.E.G. Biomonitoring of air pollution with plants e considerations for the future. In: KLUMPP, A.; ANSEL, W.; KLUMPP, G. (Ed.) **Urban Air Pollution, Bioindication and Environmental Awareness**. Cuvillier Verlag: Goettingen, 2004. p.337-373.

DE VIVES A, E. S., MOREIRA S., BRIENZA S. M. B., MEDEIROS J. B. S., TOMAZELLO FILHO M., ZUCCHI O. L. A. D, NASCIMENTO FILHO V. F.. Monitoring of the environmental pollution by trace element analysis in tree-rings using synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence. **Spectrochimica Acta Part B**, Oxford, v.61 p.1170–1174, 2006.

DONEGAN, C.S. **Dendrochemical responses to the eruption of Mount Saint Helens, Washington**. 2011. 211p. Dissertação (Master of Science) - Northern Arizona University, Arizona, 2011.

DÜNISCH, O.; MONTÓIA, V.R.; EBAUCH, J. Dendroecological investigations on *Swietenia macrophylla* King and *Cedrela odorata* L. (Meliaceae) in the central Amazon. **Trees**, Santa Monica, v.17, p.244–250, 2003.

EKLUND, M. Cadmium and Lead deposition around a Swedish battery plant as recorded in oak tree rings. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 24, p.126–131, 1995.

EMBRAPA. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/especies_arboreas_brasileiras/arvore/CONT000fyn9t2za02wx5ok0pvo4k3k93hj3v.html.> Acesso em: 13 mar. 2009.

ENGEL, V.L.; MORAIS, J.A.; POGGIANI, F. **Guia de localização e reconhecimento das principais espécies arbóreas do parque da ESALQ**. Piracicaba. FEALQ, 1985. 225p.

FARIA, B.F. **Anéis de crescimento como indicadores da contaminação ambiental: o uso da técnica de fluorescência de raios X por reflexão total com Radiação Síncrotron (SR-TXRF)**. Campinas, 2007. 151p. Dissertação (Mestrado em Saneamento e Ambiente) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

FISHER, S.; NICHOLAS, N.S.; SCHEUERMAN, P.R.. Dendrochemical analysis of Lead and Calcium in Southern Appalachian Beech. *Journal of Environmental Quality*, Madison v. 31, p. 1137– 1145, 2002. FONSECA-JÚNIOR, S.F.; PIEDADE, M.T.F.; SCHÖNGART, J.; Wood growth of *Tabebuia barbata* (E. Mey.) Sandwith (Bignoniaceae) and *Vatairea guianensis* Aubl. (Fabaceae) in Central Amazonian black-water (igapó) and white-water (vázee) floodplain forests. *Trees*, Santa Mônica, v.23, p.127–134, 2009.

FRANÇA, E.J. **A biomonitoração da Mata Atlântica na conservação da biodiversidade:** Espécies arbóreas nativas acumuladoras de elementos químicos. 2006. 362p. Tese (Doutorado em Ecologia Aplicada) –Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FORGET, E.; ZAYED, J. Tree-ring analysis for monitoring pollution by metals. In: LEWIS, T. **Tree rings as indicators of ecosystem health**. Boca Raton: CRC Press, 1995. p. 157–176.

FOSTIER, A.H. **Monitoramento de Mercúrio Atmosférico (Gasoso e Particulado) no bairro Betel (Município de Paulínia-SP)**. UNICAMP: Campinas, 2005.p.4.

FREER-SMITH, P.H.; BROADMEADOW, M.S.J. **The improvement of Urban Air Quality by Trees**. Farnham, Surrey:Arboriculture Advisory and Information Service, 1996. p 157–167 (Arboriculture Research and Information Note 135-ERB-96).

FRELICH, L.E.; BOCKHEIM, J.G.; LEIDE, J.E.. Historical trends in tree-ring growth and chemistry across an air-quality gradient in Wisconsin. **Canadian Journal Forest Research**. Ottawa v.19, p.113–121, 1989.

FRITTS, H.C. **Tree rings and climate**. New York: Academic Press, 1976. 567p.

FUKUOKA, Y.; KISHI, Y. Influences of air quality on tree ring widths. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ASIAN AND PACIFIC DENDROCHRONOLOGY, 1995, Tsukuba. **Proceedings** Tsukuba: FFPRI, 1995. p. 120-127.

GARBE-SCHONBERG C.D., REIMANN C., PAVLOV V. Laser ablation ICP-MS analyses of tree-ring profiles in pine and birch from N Norway and NW Russia – a reliable record of the pollution history of the area? **Environmental Geology**, Verlag, v.32, p.9-16, 1997.

GASSON, P.; WARNER, K.; LEWIS, G. Wood anatomy of *Caesalpinia* s.s., *Coulteria*, *Erythrostemon*, *Guilandina*, *Libidibia*, *Mezoneuron*, *Poincianella*, *Pomaria* and *Tara* (Leguminosae, Caesalpinioideae, Caesalpinieae). **Iawa Journal**, Ubrechtv. 30, n. 3, p. 247–276, 2009.

GEOKLOCK. **Relatório de Amostragem de Solo**. São Paulo, 2003. 237p.

GERALDO, S.M. **Anéis de crescimento de árvores *Tipuana tipu* como biomonitores da poluição ambiental**: quantificação pela Técnica de Fluorescência de Raios X por Reflexão Total com Radiação Síncrotron. 2011. 204p. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, -Campinas, 2011.

GILBOY, W.B.; MASON, P.I; TOUT, R.E. Time variations in environmental pollution. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest v. 48, p. 327–335, 1979

GREGER, M. Metal availability and bioconcentration in plants. In: PRASAD, M.N.V.; HAGEMEYER, J. **Heavy metal stress in plants**: from molecules to ecosystems. Berlin: Springer-Verlag, 1999. p 1–28.

GUYETTE, R.P.; CUTTER, B.E.; HENDERSON, G.S.. Long-term relationships between molybdenum and sulfur in red cedar tree rings. **Journal of Environmental Quality**, Madison, . v.18, p. 385–389, 1989.

GUYETTE, R.P.; CUTTER, B.E.; HENDERSON, G.S. Long-term relationships between mining activity and levels of lead and cadmium in tree-rings of eastern red cedar. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.20, p.146–150, 1991.

HAGEMEYER, J. Monitoring trace metal pollution with tree rings: a critical reassessment. In: MARKERT, B. **Plants as biomonitors**: indicators for heavy metals in the terrestrial environment. New York: VCH Weinheim, 1993. p. 541-563.

HAGEMEYER, J. Trace metals in tree rings: what do they tell us? In: B. MARKERT AND K. FRIESE, (Ed.). **Trace Metals in the Environment**, Local: Elsevier, 2000. v. 4.

HALL, G.S. Sample preparation methods of tree-rings for PIXE-PIGE multielemental analysis. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B**, Amsterdam, v. 49, p. 60–64, 1990.

HALL, G.S.; NAUMANN, M. Element analysis of *Pinus rigida* intra-annual growth rings by photon-induced X-ray emission. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest v. 87, p.317–330, 1984a.

HALL, G.S.; NAUMANN, M.. Trace element analysis of environmental samples by PIXE. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research** Amsterdam, v.3, p.431–435, 1984.

HARRIS, R.W.; CLARK, J.R.; MATHENY, N.P. **Arboriculture**: integrated management of landscape trees, shrubs and vines. 3th ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 687p.

HEINRICH, I.; BANKS, J. C. G. Dendroclimatological potential of the Australian red cedar. **Australian Journal of Botany**, v., 53, p. 21–32, 2005.

HELAMA, S.; LÄÄNELAID, A.; RAISIO, J.; TUOMENVIRTA, H. Oak decline in Helsinki portrayed by tree-rings, climate and soil data. **Plant and Soil**, Heilderberg, v.319, p.163–174, 2009.

HJORTENKRANS D., BERGBACK B., HAGGERUD A. New metal emission patterns in road traffic environments. **Environmental Monitoring and Assessment**, Heidelberg, v.117, p.85-98, 2006.

HOFFMANN, E.; LUDKE, C.; SCHOLZE, H.; STEPHANOWITZ, H. Analytical investigations of tree rings by laser ablation ICP-MS **Journal Analytical Chemistry**, Washington, v.350, p. 253–259, 1994.

HOLMES, R.L.; ADAMS, R.K.; FRITTS, H.C. **Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin, with procedures used in the chronology development work**. Tucson: University of Arizona, 1986.(Chronology Series VI).

HORNBECK, J.W.; SMITH, R.B. Documentation of red spruce growth decline **Canadian Journal Forest Resarch**. Ottawa, v.15, p. 1199–1201, 1985.

HRISTOVSKI S., MELOVSKI L. Radial patterns of 13 elements in the tree rings of beech trees from Mavrovo National Park, Fyrom. **Archieve. Bioogicall. Science.**, Belgrade, v. 62 , p. 351-361, 2010

IAWA COMMITTEE IAWA List of microscopic features for hardwood identification by an IAWA committee. WHEELER, E.A. P. BAAS ; GASSON, P.E. (Ed.). **IAWA Bulletin**. Leinden. v.10, p.219-332, 1989.

IBGE. **Estimativa Populacional de 2011**: Municípios brasileiros. Disponível em :<http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 12 fev.2011.

INJUK, J.; NAGJ, M.; VALKOVIC, V. Variations of trace element contents within single tree rings. **Analytica Chimica Acta** , Amsterdam, v.195, p. 299–305, 1987.

JACQUES, R.B.; TARDIF, J. WESTWOOD, R. Radial Growth of Oak and Aspen Near a Coal-Fired Station, Manitoba, Canada. **Tree-Ring Research**, Washington, v.60, n.1, p.45-58, 2004.

JANKOWSKY, I.P. Madeira juvenil: formação e aproveitamento industrial. **IPEF**, Piracicaba, v. 81, p. 1-18, 1979.

JARDIM, W. F. Metais Pesados, um dano irreparável. **Revista Brasileira de Tecnologia**, Brasília, v. 14, n.2), p. 41-45, 1983.

JARDIM, W. F.; BISINOTI, M.; SILVA, G. S. Parecer Técnico emitido à empresa Apliquim Tecnologia Ambiental. UNICAMP, Campinas, 2005. 17p.

JOHANSEN, D.A. **Plant microtechnique**. New York: MacGraw-Hill., 1940. 533p.

JOHNSON, A.H., SICCAM, T.G. Acid deposition and forest decline. **Environmental Science & Technology**, Washington, v. 17, p. 294–305, 1983.

JONG-KAB KIM, Variation of tree ring of black pines (*Pinus thunbergii*) growing in the vicinity of industrial complex in Korea. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON ASIAN AND PACIFIC DENDROCHRONOLOGY. 1995, Tsukuba e Okutama, Japan, **Proceedings...** Tsukuba e Okutama, Japan: FFPRI., 1995. p.114-119.

JONSSON, A.; EKLUND, M.; HAKANSSON, K.. Heavy metals of the 20th century recorded in oak tree rings. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 26, n.6), p. 1638, 1997.

KABATA – PENDIAS, A. Soil-plant transfer of trace elements – an environmental issue. **Geoderma**, Oxford, v.122, p.143-149, 2004.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. **Trace elements in soils and plants**. 3rd ed.. Boca Raton: CRC, 2001. 413p.

KAISER, J.; NOVOTNÝ, K.; MARTIN, M.Z.; HRDLÍČKA, A.; MALINAA, R.; HARTL, M.; ADAME, V.; KIZEKE, R. Trace elemental analysis by laser-induced breakdown Spectroscopy - Biological applications. **Surface Science Reports**, North-Holland, v.67, p.233-243, 2012.

KAMPA, M.; CASTANAS, E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution** Amherst, v.151, p. 362-367, 2008.

KAWAMURA, H.; MATSUOKA, N.; MOMOSHIMA, N.; KOIKE, M.; TAKASHIMA, Y. Isotopic evidence in tree rings for historical changes in atmospheric sulfur sources. **Environmental Science and Technology**, Easton, v. 40, n.18), p. 5750, 2006.

KHAN, A.A.; MALHOTRA, S.S. Peroxidase activity as na indicator of SO₂ injury in Jack pine and White birch. **Biochemical Physiology**. Pamplona, v.177, 613-650p. 1984.

KLUMPP, A.; HINTEMANN, T.; LIMA, J.S. ; KANDELER, E. Bioindication of air pollution effects near a copper smelter in Brazil using mango trees and soil microbiological properties. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 126, p. 313-321, 2003.

KOYAMA, M.; SHIRAKAWA, M.; TAKADA, J.; KATAYAMA, Y.; MATSUBARA, T. Trace elements in land plants: concentration ranges and accumulators of rare earths, Ba, Ra, Mn, Fe, Co and heavy halogens. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest, v.112, n.2, p. 489-506, 1987.

KUANG, Y.W.; WEN, D.Z.; ZHOU, G.Y.; CHU, G.W.; SUN, F.F. Reconstruction of soil pH by dendrochemistry of Masson pine at two forested sites in the Pearl River Delta, South China. **Annals of Forest Science**, Les Ulis, v.65, p.1-7, 2008.

KURCZYNSKA, E.U; DMUCHIWSKI, W.; WLOCH, W.; BYTNEROWICZ, A.. The influence of air pollutants on needles and stems of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees. **Enviromental Pollution**, Amherst, v. 98, n. 3, p. 325–334, 1997.

LAGEARD, J.G.A.; HOWELL, J.A.; ROTHWELL, J.J.; DREW, I.B. The utility of *Pinus sylvestris* L. in dendrochemical investigations: Pollution of lead mining and smelting in Darley Dale, Derbyshire, UK. **Environmental Pollution**, Amherst, v.153, p.284-294, 2008.

LAH, J. **Historical Biomonitoring of Heavy Metal Pollution in the Vicinity of Slovene Roads by Determination of Metal Contents in Annual Rings of Selected Tree Species**. 2012. 119p. Dissertação(Mestrado em Recursos Florestais University of Nova Gorica, Boštjan Pokorny, 2012.

LASCHOBBER C.; LIMBECK A.; RENDL J.; PUXBAUM H. Particulate emissions from on road vehicles in the Kaisermuhlen tunnel (Vienna, Austria). **Atmospheric Environment**, Oxford, v.38, p.2187-2195, 2004.

LeBLANC, D.C. Temporal and spatial variation of oak growth-climate relationships along a pollution gradient in the midwestern United States. **Canadian Journal Forest Research**. Ottawa v.23, p. 772–782, 1993.

LeBLANC, D.C.; RAYNAL, D.J.; WHITE, E.H. Acidic deposition and tree growth. The use of stem analysis to study historical growth patterns. **Journal of Environmental Quality**, v.16, p. 325–333, 1987.

LEGGE, A.H.; KAUFMANN, H.C.; WINCHESTER, J.W. Tree-ring analysis by PIXE for a historical record of soil chemistry response to acidic air pollution. **Nuclear Instruments and Methods in Physics**, Amsterdam v.3, p. 507–510, 1984.

LEGRET M.; PAGOTTO C. Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway. **Science of the Total Environment**, Oxford, v.235, p.143-150, 1999.

LÉVY G., BRÉCHET CL., BECKER M., Element analysis of tree rings in pedunculate oak heartwood: an indicator of historical trends in the soil chemistry, related to atmospheric deposition, **Annal Science Forest**, Les Ulis, v.. 53 p. 685–696, 1996.

LIN, C-J.; PEHKONEN, S. O. “The chemistry of atmospheric mercury: a review”. **Atmospheric Environment**, Amsterdam v.33, p. 2067–2079, 1999.

LISI, C.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P.C.; ROIG, F.A.; MARIA, V.R.B.; FERREIRA-FEDELE, L.; VOIGT, A.R.A. Tree-ring formation, radial increment periodicity, and phenology of tree species from a seasonal semi-deciduous forest in southeast Brazil. **IAWA Journal**, Utrecht, v. 29, n. 2, p. 189–207, 2008.

LIU, Y.; TA, W.Y.; BAO, T.Y.; YANG, Z.Y.; SONG, H.M.; LIU, N.; WANG, W.P.; ZHANG, H.Y.; ZHANG, W.; NA, Z.S. Trace elements in tree rings and their environmental effects: A case study in Xi'an City. **Science in China Series D: Earth Sciences**, v.52 (4), p.504-510, 2009.

LOBÃO, M.S. **Dendrocronologia, fenologia, atividade cambial e qualidade do lenho de árvores de *Cedrela odorata* L., *Cedrela fissilis* Vell. E *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* Hub. ex Ducke, no Estado do Acre, Brasil.** 2011. 216p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

LONG, R.P.; DAVIS, D.D. Major and trace element concentrations in surface organic layers, mineral soil, and white oak xylem downwind from a coal-fired power plant. **Canadian Journal of Forest Research**, v.19, p.1603-1615, 1989.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Nova Odessa. Editora Plantarum, 1992. v. 1, 352p.

LORENZI, H.; SOUZA, H.M.; TORRES, M.A.V.; BACKER, L.B. **Árvores exóticas do Brasil.** Nova Odessa: Editora Plantarum. 2003. v.1 384p.

LUOMA, S.N.; RAINBOW, P.S. Why is metal bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept. **Environmental Science & Technology**, Easton, v.39, n.7, p.1921-1931, 2005.

MACEDO, J.A.B **Introdução à Química Ambiental-** Juiz de Fora- MG, . 2002. 487p.

MADEJON, P.; MARANON, T.; MURILLO, J.; ROBINSON, B. White poplar (*Populus alba*) as a biomonitor of trace elements in contaminated riparian forests. **Environmental Pollution**, Amherst, v.134, p.145-155, 2004.

MAHER, B.A. MOORE, C. MATZKA, J. spatial variation in vehicle-derived metal pollution identified by magnetic and elemental analysis of roadside tree leaves. **Atmospheric Environment**, Amsterdam, v.42, p 364-373, 2008.

MAIOLI, O.L.G. **Parâmetros bioquímicos indicadores da qualidade do ar das espécies *Licania tomentosa* (benth.) e *Bauhinia forficata* (Link.) no biomonitoramento da região da grande Vitória, ES/Brasil.** 2006.141p. Dissertação(Mestrado em Engenharia Ambiental)- Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional de plantas: Princípios e aplicações.** Piracicaba:Potafos, 1997. 308p.

MARCATI, C.R.; ANGYALOSSY, V.; EVERT, R.F. Seasonal variation in wood formation of *Cedrela fissilis* (Meliaceae). **IAWA Journal**, Utrecht, v.27, n.2, p.199-211, 2006.

MARKERT, B. **Plants as Biomonitors**: indicators for heavy metals in the terrestrial environment. Weinheim: FRGermany, 1993. 644p.

MARSCHNER, H.. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. In: R.J. Wright, V.C. Baligar, and R.P. Moorman (eds), Plant-soil interactions at low pH. **Proceedings** of the Second International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, J. Beckley, West Virginia, USA. Kluwer Academic Publisher. p 683–702, 1991.

MARTIN, M.Z; LABBÉ, N. A.N.; HARRIS, R.; EBINGER, M.; WULLSCHLEGER, S.; VASS, A. High resolution applications of laser-induced breakdown spectroscopy for environmental and forensic applications. **Spectrochimica Acta** Part B: Atomic Spectroscopy, Oxford, v. 62, n.12, p. 1426-1432, 2007.

MARTIN, R.R., ZANIN, J.P., BENSETTE, M.J., Lee, M., FURIMSKY, E.. Metals in the annual rings of eastern white pine (*Pinus strobus*) in southwestern Ontario by secondary ion mass spectroscopy (SIMS). **Canadian Journal Forest Research**. Ottawa v. 27, p. 76–79, 1997.

MARTINS, A.P.G. **Cascas de árvores como biomonitores da poluição atmosférica de origem veicular em parques urbanos da cidade de São Paulo**., 2009. 110p. Tese de Doutorado(Patologia) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

MARTINS, L.C.; LATORRE, M.R.D.O.; CARDOSO, M.R.A.; GONÇALVES, F.L.T.; SALDIVA, P.H.N.; BRAGA, A.L.F. Poluição atmosférica e atendimentos por pneumonia e gripe em São Paulo, Brasil. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, v. 36, p. 88-94. 2002.

MATOS, A.T.; FONTES, M.P.F.; JORDÃO, C.P.; da COSTA, L.M. Mobilidade e formas de retenção de metais pesados em Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.379-386, 1996.

MAZZONI-VIVEIROS, S.C., KAWABATA, C.M., AFONSO, V.A. Aspectos anatômicos do lenho de *Tibouchina pulchra* Cogn. (Melastomataceae) em áreas da Serra do Mar sob o impacto da poluição atmosférica proveniente do complexo industrial de Cubatão. In: CONGRESSO NACIONAL DE BOTÂNICA, 1995, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: [s.n.], 1995. p. 39.

McCARROLL, D.; LOADER, N.J.. Stable isotopes in tree rings. **Quaternary Science Reviews**, Oxford, v. 23, p. 771–801, 2004.

McCLENAHEN, J.R., DOCHINGER, L.S.. Tree ring responses of white oak to climate and air pollution near the Ohio River Valley. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.14, p. 274–280, 1985.

McCLENAHEN, J.R.; DAVIS, D.D.; HUTNIK, R.J.. Northern red oak growth response to climate and industrial air pollution in western Pennsylvania. In: CENTRAL HARDWOOD FOREST CONFERENCE, 12., 1999. Gen. Tech. Rep SRS-24.**Proceedings...** Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station, 1999. p. 245-251.

MEDEIROS, J.G.S. **Anéis de crescimento de árvores de *Araucaria columnaris* Hook.: caracterização anatômica, densitométrica e aplicação no monitoramento ambiental.** 2005. 85 p. : il. Dissertação (Mestrado na área de Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura ‘Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

MEDEIROS, J.G.S.; TOMAZELLO FILHO, M.T.; KRUG, F.J.; VIVES, A.E. Tree-ring characterization of *Araucaria columnaris* Hook and its applicability as a lead indicator in environmental monitoring. **Dendrochronologia**, Amsterdam, v. 26, p.165–171, 2008.

MICHELAZZO, P.A.M. **Monitoração da concentração de mercúrio atmosférico na região de Paulínia/SP.** 2003. 79p. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Química, Campinas, 2003.

MONTASER, A. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, USA, (1998).964p

MOREIRA, T.C.L. **Interação da vegetação arbórea e poluição atmosférica na cidade de São Paulo.** São Paulo, 2010. 81p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

MOSKAL, T.M; HAHN, D.W. On-line sorting of wood treated with chromated copper arsenate using laser-induced breakdown spectroscopy, **Applied Spectroscopy**, Frederick, v.56, p.1337–1344, 2002.

MOTA-FILHO, F.; PEREIRA, E. C.; SILVA, R. A.; XAVIER-FILHO, L. Líquens: Bioindicadores ou Biomonitorios? Disponível em:
<http://193.136.140.52/biomonitor/index.php?option=com_content&task=view&id=9&Itemid=2> Acesso em: 03 jul. 2012.

NIMIS, P.L, LAZZARIN ,G.; LAZZARIN, A.; SKERT, N. Biomonitoring of trace elements with lichens in Veneto (NE Italy). **The Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.255, p.97–111, 2000.

NOOA. **User Guide to COFECHA output files.** Disponível em:
<<http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/treering/cofecha/userguide.html>> . Acesso em: 03 dez.e 2012.

NOWAK, D.J. Air pollution removal by Chicago’s urban forest. In: MCPHERSON, E.G.; NOWAK, D.J.; ROWNTREE, R.A. (Ed.). **Chicago’s urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project.** Radnor, Pennsylvania: USDA Forest Service General Technical Report NE-186, 1994. p 63–81.

NOWAK, D.J.; MCHALE, P.J.; IBARRA, M.; CRANE, D. ;STEVENS, J.C. ; LULEY, C.J. Modelling the effects of urban vegetation on air pollution. In: GRYNING, S.; CHAUMERLIAC, N. (Ed.) **Air Pollution Modelling and its Application XII**, New York: Plenum Press, 1998. p. 399-407.

NUNES, L.C. **Estratégias quimiométricas para análise de plantas por espectrometria de emissão óptica com plasma induzido por laser**. 2010. 149p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Federal de São Carlos, 2010.

OLIVEIRA, H.; FERNANDES, E.A.N.; FERRAZ, E.S.B. Determination of trace elements in tree rings of *Pinus* by neutron activation analysis. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest, v. 217, n. 1, p. 125-129, 1997.

OLIVEIRA, M.R.; HORN, A.H. Comparação da concentração de metais pesados nas águas do Rio São Francisco em Três Marias, desde 1991 até hoje, relacionando a atuação da CMM-Três Marias. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 14, n.1,2), p.55-63, 2006.

ORECCHIO, S.; GIANGUZZA, A.; CULOTTA, L. Absorption of polycyclic aromatic hydrocarbons by *Pinus* bark: Analytical method and use for environmental pollution monitoring in the Palermo area (Sicily, Italy). **Environmental Research**, Amsterdam, v.107, p.371-379, 2008.

PADILLA L. K., ANDERSON, A.K. Trace element concentration in tree-rings biomonitoring centuries of environmental change. **Chemosphere**, Oxford, v.49, p.575-585, 2002.

PATRICK, G.J.; FARMER J.G. A stable lead isotopic investigation of the use of sycamore tree-rings as a historical biomonitor of environmental lead concentrations. **Science of the Total Environment**, Oxford, v.362, p.278-291, 2006.

PAULA, J. E. de; ALVES, J. L. de H. **897 madeiras nativas do Brasil: anatomia - dendrologia - dendrometria - produção - uso**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2007. 438p.

PENNINCKX, V., GLINEUR, S., GRUBER, W., HERBAUTS, J. MEERTS, P.,. Radial variations in wood mineral element concentrations: a comparison of beech and edunculate oak from the Belgian Ardennes. **Annal Forest Science**, Le Ullis v. 58, p.253-260. 1999.

PETERSON, D.L; ANDERSON, D.R. **Content of chemical elements In tree rings of lodgepole pine and whitebark pine from a subalpine Sierra Nevada Forest**. Berkeley, CA: Pacific Southwest Research Station, Forest Service, U.S. Department of Agriculture; 1990. 9p.

POPE CA III, BURNETT RT, THUN MJ, CALLE EE, KREWSKI D, ITO K, THURSTON GD. Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. **Journal of the American Medical Association**, Chicago, v.9, p.1132-1141, 2002.

POTTER, S. **Laser-induced breakdown Spectroscopy (LIBS): a novel wood quality evaluation tool**. Gottstein.: J. W. Gottstein memorial trust fund. 2006. 32p.(Gottstein fellowship report.).

PRAKASH, L.; SINGH, R. Chemical constituents of stem bark and root heartwood of *Tabebuia pentaphylla* (Linn.) Hemsl. (Bignoniaceae). **Pharmazie**, Eschborn ,v. 35, n. 12, p.813, 1980.

PRITCHETT, W.L.; FISHER, R.F. **Properties and management of forest soils**. New York: John Wiley, 1987. 494p.

PRIYA, P.B.; BHAT, K.M.. Influence of rainfall, irrigation and age on the growth periodicity and wood structure in teak (*Tectona grandis*). **IAWA Journal**, Ubrecht v. 20, p. 181–192, 1999.

PROCHNOW, T.R. **Avaliação de áreas com rejeitos da mineração de carvão, com ênfase em bioindicadores vegetais para metais pesados, no município de Charqueadas, RS**. 1995. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Pós-Graduação em Ecologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

PUCKETT, L.J. Acid rain, air pollution and tree growth in Southeastern New York. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.11, p. 376–381, 1982.

QMS Tree ring analyzer users guide. Model QTRS-01X. Quintek Measurement Systems. Knoxville, Tennessee. 1999. 72p.

QUEIROLO, F.; VALENTA, P. Trace determination of Cd, Cu, Pb and Zn in annual growth rings by differential pulse anodic stripping voltammetry. **Fresenius' Journal of Analytical Chemistry**. Heidelberg v. 328, p. 93–98, 1987.

RADZIEMSKI, L.J. From LASER to LIPS: the path of technology development, **Spectrochimica Acta Part B**, Oxford, v.57, p.1109–1113, 2002.

ROBITAILLE, G.. Heavy-metal accumulation in the annual rings of balsam fir *Abies balsamea* (L.) Mill. **Environmental Pollution** . Amherst, v.2, p. 193–202, 1981.

RODE, B.; GARTNER, D.; LOGAR, M.; KANDU, C. **Informative inventory report 2010 for Slovenia Submission under the UNECE convention on long-range transboundary air pollution**. Ljubljana Ministry of the environment and spatial planning, Environmental agency of the Republic of Slovenia, 2010.

ROIG, F.A.; OSORNIO, J.J.J.; DIAZ, J.V.; LUCKMAN, B.; TIESSEN, H.; MEDINA, A.; NOELLEMAYER, E.J. Anatomy of growth rings at the Yucatán Peninsula. **Dendrochronologia**, Milão, v.22, p.187–193, 2005.

ROLFE, G. L. Lead distribution in tree rings. **Forest Science**, Bethesda, v. 20, n. 3, p. 283–286. 1974.

RODE, B.; GARTNER, D.; LOGAR, M.; KANDU, C. **Informative inventory report 2010 for Slovenia Submission under the UNECE convention on long-range transboundary air pollution**. Ljubljana Ministry of the environment and spatial planning, Environmental agency of the Republic of Slovenia, 2010.

ROIG, F.A.; OSORNIO, J.J.J.; DIAZ, J.V.; , LUCKMAN, B.; TIESSEN, H.; MEDINA, A.; NOELLEMAYER, E.J. Anatomy of growth rings at the Yucatán Peninsula. **Dendrochronologia**, Milão, v.22, p.187-193, 2005.

ROZAS, V. Detecting the impact of climate and disturbances on tree rings of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in a lowland forest in Cantabria, Northern Spain, **Annals Forest Science**, Les Ulis v. 58, p. 237– 251, 2001.

SANTOS, N. R. Z.; TEIXEIRA, I. F. **Arborização de vias públicas: Ambiente x Vegetação**. Instituto Souza Cruz, 1ª ed. Porto Alegre: Ed. Pallotti. 2001. 135 p

SASS, J.E. **Botanical microtechnique**. 2nd .ed. Iowa: State College Press, 1951. 228 p.

SAVARD, M.; BEGIN, C.; PARENT, M.; MARION, J.; SMIRNOFF, A. Dendrogeochemical distinction between geogenic and anthropogenic emissions of metals and gases near a copper smelter. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis** 62006. , p. 237–247.

SCHWARTZ, J.; DOCKERY, D.W.. Particulate air pollution and daily mortality in Steubenville, Ohio. **American Journal of Epidemiology**, Oxford, v. 135, p. 12-19, 1992.

SCHWARTZ, J.; MARCUS, A. Mortality and air pollution in London: a time series analysis. **American Journal of Epidemiology**, Oxford, v. 131, p. 185-194, 1990.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings and environment: Dendroecology**. Berna: Paul Haupt Publishers, 1996. 609p.

SCHWEINGRUBER, F.H. **Tree rings: basics and applications of dendrochronology**. Dordrecht: Reidel, 1988. 276p.

SEGALA ALVES, E. The effects of the pollution on wood of *Cecropia glazioui* (Cecropiaceae). **IAWA Journal**, Leiden, v. 16, n. 1, p. 69-80, 1995.

SHARMA, P.K.; KHANNA, R.N.; ROHATGI, B.K.; THOMSON, R.H. Tecomaquinone-III: A new quinone from *Tabebuia pentaphylla*. **Phytochemistry**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p.632-233, 2001.

SHORTLE, W.C.; SMITH, K.T.; MINOCHA, R.; ALEXEYEV, V.A. Similar patterns of change in stemwood calcium concentration in red spruce and Siberian fir. **Journal of Biogeography**, Norwich, v. 22, p. 467-473. 1995.

SHTANGEEVA, I.V. Variation of the elemental composition of plants and soils. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, Budapest, v.177, n.2, p.381-391, 1994.

SIJM, D.T.H.M.; HERMENS, J.L.M. Internal effect concentration: link between bioaccumulation and ecotoxicity for organic chemicals. In: BEEK, B. (Ed.). **The handbook of environmental chemistry**. Berlim: Springer-Verlag, 2000. v.2, chap.1, p. 167-199.

SILVA, F.R. Estudo de Contaminação de Solo e Águas Subterrâneas – Diagnóstico Detalhado. Apliquim, Paulínia, 2005. 37p.

SILVA, L.B.; SANTOS, F.A.R.; GASSON, P.; CUTLER, D. Anatomia e densidade básica da madeira de *Caesalpinia pyramidalis* Tul. (Fabaceae), espécie endêmica da Caatinga do Nordeste do Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, São Paulo, v.23, n.2, p.436-445, 2009.

SILVA, M.F. **Emissão de metais por veículos automotores e seus efeitos à saúde pública**. 2007. 156p. Tese (Doutorado em Saúde Pública) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo.

SIMABUCO, S.M. Radiografia da poluição de Campinas. In: **Pesquisa FAPESP**. http://revistapesqui.../print.php?lang=pt&id=revista1.fapesp1..20010710.20010362..SEC7_1. Acesso em : 06 Ago. 2002.

SIWIK, E.I.H. **Spatial, temporal and dendrochronological comparisons of mercury in Ontario deciduous**. 2007. 157p. Dissertação de (Mestrado na área de Recursos Florestais) Queen's University, Ontario, Canadá. 2007.

SMITH, K. T.; SHORTLE, W. C. Tree biology and dendrochemistry. In Tree Rings, Environment and Humanity. **Proceedings** of an International Conference; Dean, J. S.; Meko, D. M.; Swetnam, T. W., Eds.; Radiocarbon: Tucson, AZ, 1996; pp 629–635.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil Taxonomy**: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd ed. Washington: Nat. Res. Cons. Serv.. 1999. 869p. (USDA Agr. Handbook, 436).

STERNER, R.W. Elemental stoichiometry of species in ecosystems. In: JONES, C.G.; LAWTON, J.H. (Ed.). **Linking species & ecosystems**. New York: Chapman & Hall, 1995. p. 240-252.

STRAIT, B.; STUMM, W. Chemical properties of metals and the process of bioaccumulation in terrestrial plants. In: MARKERT B. (Ed.) **Plants as biomonitors: Indicators for heavy metals in the terrestrial environment**. Weinheim Germany: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1993. p.31-62.

SYMEONIDES, C. Tree-ring analysis for tracing the history of pollution: Application to a study in northern Sweden. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.8, p.482-486, 1979.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719p.

TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P.C.; LISI, C.S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais. In: MAIA, N.B.; MARTOS, H.L.; BARRELLA, W. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo, 2001. p. 117-143.

TRESMONDI, A.C.C.L. **Qualidade do ar na área de influência do pólo industrial de Paulínia-SP: 2000-2002**. 2003. 385p. Tese (Doutorado na área de Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP:2003.

TRIVELIN, P.C.O. **Fracionamento dos isótopos estáveis de carbono na fixação do CO₂ atmosférico por plantas C3, C4 e CAM: aplicações**. Piracicaba: Apostila do Curso de Pós-Graduação em Energia Nuclear na Agricultura, CENA/USP, 2009. 27p.

TROUET, V.; COPPIN, P.; BEECKMAN, H. Annual Growth Ring Patterns in *Brachystegia spiciformis* Reveal Influence of Precipitation on Tree Growth. **Biotropica**, Washington, v.38, n.3, p. 375–382, 2006.

VELOSO, H. P.; RANGEL-FILHO, A.L.R.; LIMA, J.C.A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE,1991. 124p.

VETTER, R.E.; BOTOSSO, P.C. Remarks on age and growth rate determination of Amazonian trees. **IAWA Bulletin National Herbarium Nederland**, Leiden, v. 10, n. 2, p. 133-145, 1989.

VIVES, A.E.S.; MOREIRA, S.; BRIENZA, S.M.B.; MEDEIROS, J.G.S.; TOMAZELLO FILHO, M.; ARAÚJO, O.M.; ZUCCHI, D.; NASCIMENTO FILHO, V.F. Species arboreal as a bioindicator of the environmental pollution. **Nuclear Instruments and Methods in Physics**, Amsterdam, v.579,p.494–498, 2006.

VITAL, B.R. **Métodos de determinação da densidade da madeira** Viçosa: SIF., 1984. 21p. (Boletim Técnico, 1).

VOLLAND-VOIGT, F.; BRAUNING, A.; GANZHI, O.; PETERS, T.; MAZA, H.. Radial stem variations of *Tabebuia chrysantha* (Bignoniaceae) in different tropical forest ecosystems of southern Ecuador. **Trees**, Santa Monica, v.25, p.39–48, 2011.

VROBLESKY, D. A.; YANOSKY, T.M.. Use of tree-ring chemistry to document historical ground-water contamination events. **Ground Water**,Maulden, v. 28, n. 5, p. 677–684, 1990.

WAGER, D.J.; BAKER, F.A. Potential effects of ozone, climate, and spruce budworm on Douglas-fir growth in the Wasatch Mountains. **Canadian Journal of Forest Research**, v.33, p. 910-921, 2003.

WAGNER, R. J.; KAYE, M.W.; ABRAMS, M.D.; HANSON, P.J.; MARTIN, M. Tree-ring growth and wood chemistry response to manipulated precipitation variation for two temperate *Quercus* species. **Tree-Ring Research**, Washington, v.68, n.1, p.17–29, 2012
WATMOUGH, S.A. Monitoring historical changes in soil and atmospheric trace metal levels by dendrochemical analysis. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 106, p. 391-403, 1999.

WATMOUGH, S. A. A dendrochemical survey of sugar maple (*Acer Saccharum* Marsh) in south-central Ontario, Canada. **Water Air Soil Pollution**, Germantown, v. 136 p. 165–187, 2002.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C. Analysis of tree rings using inductively coupled plasma mass spectrometry to record fluctuations in a metal pollution episode. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 93, n. 1, p. 93–102, 1996.

WATMOUGH, S. A.; HUTCHINSON, T.C. Change in the dendrochemistry of sacred fir close to Mexico City over the past 100 years. **Environmental Pollution**, Amherst, v. 104, p. 79-88.1999.

WATMOUGH, S.A.; HUTCHINSON, T.C. Historical changes in lead concentrations in tree-rings of sycamore, oak and Scots pine in north-west England. **Science of the Total Environment**, Oxford, v.293, p.85-96, 2002.

WATMOUGH, S.A., HUTCHINSON, T.C., EVANS, R.D.. Application of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry in dendrochemical analysis. **Environmental Science Technology**. Washington, v.31, p. 114–118, 1997.

WATT, F.L.S.; PYLE, M.D.;MATHER, A.T.; DAY, J.A.;AUIPPA, A. The use of tree-rings and foliage as an archive of volcanogenic cation deposition. **Environmental Pollution**, Amherst, v.148, p.48-61, 2007.

WEISS, P.; OFFENTHALER, I.; OHLINGER, R.; WIMMER, J. Higher plants as accumulative bioindicators In: MARKERT, B.A.; BREURE, A.M.; ZECHMEISTER, H.G. **Bioindicators & Biomonitors** : Principles, Concepts, and Applications. Oxford: Elsevier, 2003. p.465-500.

WILCZYŃSKI, S. The variation of tree-ring widths of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) affected by air pollution. **European Journal of Forest Research**, v.125, p. 213–219. 2006.

WITTE K.M, WANTY R.B., RIDLEY W.I.,Engelmann Spruce (*Picea engelmannii*) as a biological monitor of changes in soil metal loading related to past mining activity.**Applied Geochemistry**, Oxford, v.19, p. 1367–1376, 2004.

WOODWARD, F.I. Plant responses to past concentration of CO₂. **Vegetatio**, v.104/105, p.145-155, 1993.

WORBES, M. One hundred years of tree-ring research in the tropics: a brief history and an outlook to future challenges. **Dendrochronologia**, Milão, v.20, p.217-231, 2002.

WORBES, M.; JUNK, W.J. How old are tropical trees? The persistence of a myth. **IAWA Journal**, Ubrecht, v. 20, n. 3, p. 255-260, 1999.

ZECHMEISTER H.G.; DULLINGER S.; HOHENWALLENR D.; RISS A.; HANUS-ILLNAR A.; SHARF, S . Pilot study on road traffic emissions (PAHs, heavy metals) measured by using mosses in a tunnel experiment in Vienna, Austria. **Environmental Science and Pollution Research**, Heildelberg, v.13, p.398-405, 2006.

ZHANG, L. ; QIAN, J-L.; PLANAS, D. Mercury concentration in tree rings of *Picea mariana* Mill. in boreal Québec, Canada. **Water, Air, and Soil Pollution**, Germantown, v. 81, p. 163–173, 1995.

ANEXOS

ANEXO A

Elemento	Axial (µg/g)	Radial (µg/g)	M.C	Unid.	Transf. (mg/kg)	Recuperação (%)	
						Axial	Radial
Al	670	995	580	mg/kg	580	115	172
B	7,9	8,2	10	mg/kg	9,6	83	85
Ca	2101	2106	0,25	%	2500	84	84
Cd	0,24	0,26	0,23	mg/kg	0,23	102	112
Co	0,02	0,07	0,06	mg/kg	0,06	40	111
Cr	0,31	0,13	0,40	mg/kg	0,40	78	31
Cu	2,5	2,6	2,8	mg/kg	2,8	88	92
Fe	41	42	46	mg/kg	46	90	90
K	3243	3304	0,42	%	4170	78	79
Mg	782	754	0,11	%	1060	74	71
Mn	399	399	488	mg/kg	488	82	82
Na	42	46	63	mg/kg	63	67	74
Ni	1,0	1,0	1,5	mg/kg	1,47	66	70
P	967	1004	0,11	%	1070	90	94
Pb	0,25	0,00	0,17	mg/kg	0,17	148	.
Si	1895	2049	.	mg/kg	.	.	.
Zn	32	32	38	mg/kg	38	85	85
MÉDIA	.	.	.	.	.	86	89

Anexo A1 – Análise do material certificado NIST 1575a – *Trace elements in Pine Needles* por ICP OES

ANEXO B

Espécie	Árvore	Sítio		
		Urbano	Periurbano	Rural
<i>Caesalpinia pluviosa</i>	1	38,52	47,11	23,24
	2	54,43	30,24	26,42
	3	42,97	36,29	29,28
	4	36,29	26,74	29,60
	5	55,07	27,37	50,29
	6	58,57	30,88	.
	7	67,48	28,33	.
	8	37,56	37,24	.
	9	.	33,74	.
Média		48,86	33,10	31,77
<i>Tabebuia pentaphylla</i>	1	43,93	45,52	33,10
	2	50,29	37,88	33,10
	3	42,65	30,40	31,51
	4	42,34	40,43	36,61
	5	44,24	25,78	40,11
	6	47,75	28,33	31,83
	7	42,34	34,38	40,43
	8	40,11	32,15	.
	9	45,52	30,24	.
	10	53,48	46,79	.
	11	53,16	40,11	.
	12	32,79	31,19	.
	13	49,34	46,15	.
	14	48,70	44,56	.
	15	39,47	30,56	.
	16	34,70	.	.
Média		44,42	36,30	35,24

Anexo B1 – Diâmetro a altura do peito (cm) das árvores de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*

ANEXO C

Espécie	Amostra	Densidade (g/cm³)					Raio (cm)
		Média	Máxima	Mínima	Desvpad	C.V. (%)	
<i>Caesalpinia pluviosa</i>	1	1,055	1,496	0,561	0,156	14,797	18,108
	2	0,938	1,313	0,593	0,138	14,667	14,596
	3	1,060	1,437	0,545	0,121	11,435	11,436
	4	1,038	1,370	0,600	0,125	12,051	23,348
	5	1,050	1,290	0,673	0,104	9,902	14,804
	6	1,042	1,252	0,651	0,090	8,633	15,244
	7	1,002	1,433	0,582	0,113	11,320	13,558
	8	1,091	1,421	0,519	0,117	10,752	17,872
Média	.	1,035	1,376	0,590	.	.	16,121
<i>Tabebuia pentaphylla</i>	1	0,692	0,969	0,380	0,084	12,130	14,336
	2	0,675	1,155	0,406	0,106	15,714	24,796
	3	0,637	0,989	0,451	0,086	13,453	16,728
	4	0,650	0,966	0,416	0,098	15,013	13,608
	5	0,677	0,955	0,403	0,085	12,576	9,900
	6	0,595	0,915	0,335	0,095	15,914	15,924
	7	0,621	0,988	0,352	0,095	15,236	18,216
	8	0,681	1,102	0,386	0,104	15,285	14,348
Média	.	0,654	1,005	0,391	.	.	15,982

Anexo C1 – Densidade aparente média, máxima e mínima , parâmetros estatísticos (desvio padrão e coeficiente de variação) e comprimento (raio) das amostras do lenho de *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*

ANEXO D

Anexo D1 - Perfis radiais da densidade aparente do lenho das árvores de *C. pluviosa* (amostras 1 a 4)

Anexo D2 - Perfis radiais da densidade aparente do lenho das árvores de *C. pluviosa* (amostras 5 a 8)

Anexo D3 - Perfis radiais da densidade aparente do lenho das árvores de *T. pentaphylla* (amostras 1 a 4)

Anexo D4 - Perfis radiais da densidade aparente do lenho das árvores de *T. pentaphylla* (amostras 5 a 8)

ANEXO E

Espécie	Sítio	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
				Limite inferior	Limite superior			
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	Al	282,19	154,52	409,85	200,93	87,68	773,96
		B	121,94	77,40	166,48	70,10	25,29	210,25
		Ca	7566,28	4498,20	10634,36	4828,81	3578,15	20102,25
		Cu	763,21	482,74	1043,67	441,42	340,31	1855,08
		Fe	485,08	141,49	828,66	540,76	95,10	2034,98
		K	1746,49	1080,10	2412,87	1048,82	873,25	3828,18
		Mg	2116,00	1554,09	2677,90	884,37	895,21	4016,93
		Mn	208,86	98,19	319,53	174,18	29,52	504,73
		Na	1984,83	1801,74	2167,92	288,16	1526,18	2554,30
		P	332,54	100,11	564,97	365,82	15,37	1164,95
		Si	478,20	222,15	734,24	402,98	165,28	1625,90
		Zn	56,59	30,37	82,81	41,27	17,77	163,35
	Periurbano	Al	182,98	124,98	240,98	116,63	41,75	451,35
		B	142,49	45,66	239,31	194,70	37,88	878,03
		Ca	4532,53	2921,72	6143,34	3239,19	1081,63	11257,78
		Cu	398,44	334,41	462,48	128,77	225,65	720,90
		Fe	949,40	502,14	1396,66	899,41	15,08	3406,43
		K	1715,21	1247,25	2183,16	941,02	550,78	3472,75
		Mg	1316,20	964,48	1667,92	707,27	478,37	3501,83
		Mn	304,53	193,97	415,09	222,33	16,20	746,53
		Na	1386,44	1264,47	1508,41	245,27	947,40	2028,30
		P	109,19	58,16	160,23	102,63	24,63	395,13
		Si	340,85	251,91	429,79	178,86	103,26	884,00
		Zn	115,41	67,20	163,62	96,94	12,92	412,83
	Rural	Al	220,26	124,44	316,07	150,80	53,75	517,90
		B	122,97	42,39	203,54	126,81	35,29	380,38
		Ca	7770,49	2863,87	12677,10	7722,45	1087,77	21854,25
		Cu	509,79	409,83	609,75	157,33	267,52	759,97
		Fe	311,10	100,36	521,84	331,68	19,69	1041,42
		K	1784,20	779,06	2789,33	1581,97	509,29	4693,70
		Mg	1599,60	945,89	2253,31	1028,86	485,55	3035,35
		Mn	129,84	35,59	224,08	148,33	13,71	420,75
		Na	1575,97	1358,30	1793,65	342,60	996,20	2223,95
		P	115,80	11,89	219,71	163,54	15,15	484,92
		Si	315,30	195,96	434,64	187,83	82,72	585,15
		Zn	115,36	20,91	209,82	148,67	12,88	459,69

Anexo E1 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes do lenho das árvores de *C. pluviosa* nos 3 sítios do estudo

Espécie	Sítio	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
				Limite inferior	Limite superior			
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	Al	212,62	162,17	263,07	101,45	70,10	497,66
		B	66,03	46,83	85,23	38,61	24,46	159,96
		Ca	5380,25	2996,53	7763,97	4793,43	1332,88	15281,25
		Cu	669,73	476,79	862,67	387,99	279,37	1848,39
		Fe	367,42	219,31	515,53	297,84	63,37	1154,80
		K	1139,31	793,52	1485,10	695,36	577,67	3141,65
		Mg	1573,77	1250,05	1897,48	650,96	608,46	2668,95
		Mn	106,63	59,87	153,39	94,03	17,95	327,90
		Na	1575,15	1428,20	1722,10	295,51	1101,51	2160,35
		P	158,52	76,44	240,60	165,05	23,93	534,29
		Si	491,61	366,56	616,66	251,47	148,55	1230,39
		Zn	45,22	34,98	55,46	20,60	19,25	85,25
	Periurbano	Al	145,36	93,64	197,07	103,99	33,69	462,29
		B	175,98	39,87	312,10	273,72	24,94	1033,58
		Ca	1940,07	1449,96	2430,17	985,56	985,68	3753,15
		Cu	355,14	281,56	428,72	147,97	159,55	645,99
		Fe	320,38	74,83	565,93	493,78	7,48	1553,80
		K	1116,38	782,17	1450,58	672,06	499,31	2625,95
		Mg	836,77	637,12	1036,42	401,48	337,89	1816,13
		Mn	154,31	54,77	253,84	200,15	16,70	659,18
		Na	1350,33	1211,87	1488,80	278,43	865,45	1999,95
		P	113,88	78,39	149,37	71,37	23,37	265,95
		Si	446,72	345,94	547,50	202,67	79,41	957,74
		Zn	31,19	20,03	42,35	22,44	9,46	97,73
	Rural	Al	173,09	97,83	248,35	151,34	56,20	594,50
		B	95,38	52,87	137,89	85,47	31,96	286,17
		Ca	5490,43	2348,71	8632,16	6317,72	793,57	17936,00
		Cu	455,07	362,18	547,95	186,78	237,60	1008,59
		Fe	449,86	103,50	796,23	696,50	27,23	2378,70
		K	1329,32	753,95	1904,70	1157,02	488,52	4064,05
		Mg	1289,35	823,99	1754,70	935,78	347,14	3009,53
		Mn	161,16	58,75	263,58	205,94	12,90	624,25
		Na	1406,98	1116,03	1697,94	585,09	715,31	2804,40
		P	125,93	61,01	190,85	130,55	26,56	486,73
		Si	260,16	164,39	355,92	192,58	72,21	708,05
		Zn	108,21	34,04	182,39	149,16	14,77	448,73

Anexo E2 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes do lenho das árvores de *T. pentaphylla* dos 3 sítios do estudo

Espécie	Sítio	Posição	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior			
<i>C. pluviosa</i>	Urbano	Início	Al	351,06	96,12	606,00	160,22	240,86	582,73
			B	118,74	-3,28	240,76	76,68	25,29	201,75
			Ca	11199,66	1058,12	21341,19	6373,42	5219,45	20102,25
			Cu	520,85	131,75	909,95	244,53	340,31	868,66
			Fe	437,45	-194,53	1069,42	397,16	95,10	1010,88
			K	2633,54	992,97	4274,11	1031,01	1355,25	3828,18
			Mg	2042,93	-127,85	4213,71	1364,22	895,21	4016,93
			Mn	247,27	-44,60	539,14	183,43	44,00	482,88
			Na	1898,07	1635,82	2160,31	164,80	1681,20	2029,25
			P	160,22	-284,55	604,98	279,51	15,37	579,45
			Si	429,83	94,53	765,14	210,72	225,54	684,12
			Zn	71,58	-27,11	170,28	62,02	27,25	163,35
		Meio	Al	139,54	45,12	233,96	59,34	87,68	221,70
			B	112,51	-33,40	258,42	91,70	28,71	205,75
			Ca	7131,29	1386,30	12876,27	3610,42	4020,03	10913,03
			Cu	886,23	-169,73	1942,20	663,62	383,13	1855,08
			Fe	285,60	110,79	460,42	109,86	156,35	385,06
			K	1611,37	-84,14	3306,89	1065,54	873,25	3190,45
			Mg	2379,91	1375,82	3384,00	631,01	2022,45	3322,68
			Mn	90,96	-92,74	274,67	115,45	29,52	264,00
			Na	1958,25	1233,36	2683,14	455,55	1526,18	2554,30
			P	270,11	-235,12	775,35	317,51	23,35	708,80
			Si	219,18	114,61	323,76	65,72	165,28	313,09
			Zn	55,78	43,14	68,42	7,94	45,38	63,19
		Fim	Al	355,96	-88,80	800,71	279,51	194,01	773,96
			B	134,56	42,00	227,12	58,17	68,46	210,25
			Ca	4367,90	3429,45	5306,36	589,77	3578,15	4927,70
			Cu	882,53	387,51	1377,55	311,09	562,05	1277,95
			Fe	732,18	-659,50	2123,87	874,60	158,34	2034,98
			K	994,55	855,33	1133,76	87,49	880,68	1069,68
			Mg	1925,15	846,01	3004,30	678,19	1487,85	2929,53
			Mn	288,34	-10,83	587,52	188,02	128,20	504,73
			Na	2098,18	1773,35	2423,02	204,14	1818,00	2283,20
			P	567,29	-132,61	1267,20	439,85	181,47	1164,95
			Si	785,57	-126,01	1697,15	572,88	359,14	1625,90
			Zn	42,41	-24,45	109,26	42,02	17,77	105,23

Anexo E3 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *C. pluviosa* do sítio urbano

Espécie	Sítio	Posição	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior			
<i>C. pluviosa</i>	Periurbano	Início	Al	288,79	183,30	394,27	100,52	164,57	451,35
			B	114,39	54,07	174,70	57,48	47,75	208,31
			Ca	7502,10	4061,17	10943,03	3278,84	3698,50	11257,78
			Cu	468,56	296,60	640,52	163,86	277,02	720,90
			Fe	1178,49	431,48	1925,50	711,82	269,61	2050,48
			K	2158,38	1042,12	3274,63	1063,67	845,37	3472,75
			Mg	1892,91	958,71	2827,11	890,19	1080,22	3501,83
			Mn	499,71	318,30	681,12	172,87	296,34	746,53
			Na	1490,75	1196,16	1785,34	280,71	1207,60	2028,30
			P	134,95	-28,83	298,74	156,07	33,93	395,13
			Si	454,09	208,09	700,08	234,41	239,08	884,00
			Zn	187,18	62,22	312,15	119,08	61,06	412,83
		Meio	Al	134,36	38,23	230,49	91,60	41,75	273,00
			B	269,70	-50,93	590,34	305,53	46,33	878,03
			Ca	3656,56	1544,89	5768,22	2012,19	1777,23	7433,80
			Cu	354,90	248,81	460,98	101,08	270,21	544,41
			Fe	1435,57	296,83	2574,31	1085,10	272,72	3406,43
			K	1938,01	1238,04	2637,97	667,00	978,18	2477,75
			Mg	1145,07	821,28	1468,87	308,54	715,89	1564,73
			Mn	260,86	115,74	405,97	138,28	113,10	459,22
			Na	1382,85	1154,99	1610,70	217,12	1199,15	1794,08
			P	78,99	-4,21	162,20	79,29	24,63	218,51
			Si	226,59	104,96	348,21	115,89	103,26	419,52
			Zn	83,04	4,11	161,96	75,21	16,65	193,11
		Fim	Al	125,80	34,55	217,05	86,96	43,28	277,88
			B	43,37	34,13	52,61	8,81	37,88	60,13
			Ca	2438,93	310,96	4566,90	2027,73	1081,63	6206,70
			Cu	371,87	265,46	478,29	101,40	225,65	509,06
			Fe	234,15	-107,07	575,36	325,14	15,08	835,67
			K	1049,24	231,63	1866,86	779,10	550,78	2604,70
			Mg	910,62	463,50	1357,74	426,06	478,37	1593,00
			Mn	153,02	-65,90	371,94	208,61	16,20	493,25
			Na	1285,74	1043,33	1528,14	230,98	947,40	1537,33
			P	113,63	53,80	173,46	57,01	32,33	176,68
			Si	341,88	240,51	443,25	96,59	216,70	498,18
			Zn	76,00	20,32	131,68	53,06	12,92	145,75

Anexo E4 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *C. pluviosa* do sítio periurbano

Espécie	Sítio	Posição	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior			
<i>C. pluviosa</i>	<i>Rural</i>	Início	Al	311,85	63,81	559,90	155,88	139,03	517,90
			B	231,10	-14,23	476,42	154,17	76,29	380,38
			Ca	14024,46	-97,76	28146,68	8875,07	3696,45	21854,25
			Cu	555,39	361,73	749,04	121,70	460,61	733,33
			Fe	591,09	34,45	1147,72	349,81	199,40	1041,42
			K	2917,27	709,24	5125,30	1387,63	1006,93	4218,00
			Mg	2054,49	275,15	3833,83	1118,22	799,89	3028,05
			Mn	247,32	-8,99	503,63	161,08	31,27	420,75
			Na	1873,03	1367,39	2378,68	317,77	1467,12	2223,95
			P	126,92	-206,09	459,93	209,28	15,15	440,75
			Si	431,67	155,46	707,88	173,58	184,75	585,15
			Zn	267,64	-14,83	550,11	177,52	39,48	459,69
		Meio	Al	211,39	-71,02	493,81	177,48	53,75	377,87
			B	97,55	-58,39	253,50	98,00	35,29	241,63
			Ca	6982,95	-3866,97	17832,88	6818,61	1087,77	15037,80
			Cu	453,51	141,81	765,21	195,89	267,52	713,11
			Fe	240,23	-262,99	743,45	316,25	23,38	706,32
			K	1738,22	-1418,51	4894,94	1983,84	509,29	4693,70
			Mg	1285,35	-618,73	3189,42	1196,61	485,55	3035,35
			Mn	123,05	-101,22	347,31	140,94	21,79	321,68
			Na	1329,73	838,25	1821,21	308,87	996,20	1741,75
			P	156,02	-193,81	505,85	219,85	24,73	484,92
			Si	258,40	-77,79	594,59	211,28	82,72	549,33
			Zn	55,45	-22,54	133,44	49,01	12,88	107,17
		Fim	Al	137,53	2,82	272,25	84,66	74,76	260,22
			B	40,25	33,63	46,87	4,16	35,83	45,13
			Ca	2304,05	1084,89	3523,21	766,18	1461,10	3320,10
			Cu	520,48	242,92	798,03	174,43	347,08	759,97
			Fe	101,98	-68,45	272,41	107,10	19,69	257,96
			K	697,11	446,41	947,80	157,55	552,79	921,59
			Mg	1458,96	67,08	2850,83	874,72	959,78	2764,50
			Mn	19,14	6,37	31,91	8,03	13,71	30,96
			Na	1525,16	1240,35	1809,97	178,99	1396,13	1790,10
			P	64,46	48,69	80,22	9,91	52,06	72,81
			Si	255,83	-8,07	519,72	165,84	112,03	494,27
			Zn	23,00	12,32	33,68	6,71	16,63	31,56

Anexo E5 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *C. pluviosa* do sítio rural

Espécie	Sítio	Posição	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior			
<i>T. pentaphylla</i>	Urbano	Início	Al	242,81	311,88	243,90	142,38	323,59	181,21
			B	100,94	153,68	100,94	41,83	159,96	118,13
			Ca	11305,47	15192,44	11410,54	5438,45	15281,25	9842,80
			Cu	559,28	816,60	556,00	279,37	898,21	618,84
			Fe	377,66	557,94	378,93	103,45	629,16	525,71
			K	1803,98	2739,11	1789,86	720,54	3141,65	2421,11
			Mg	1464,59	2079,83	1446,68	735,80	2515,80	1780,00
			Mn	187,80	289,46	188,10	42,33	327,90	285,57
			Na	1298,53	1457,02	1294,51	1101,51	1567,73	466,22
			P	193,16	464,43	183,61	23,93	534,29	510,36
			Si	424,84	604,77	426,89	188,20	624,60	436,40
			Zn	60,89	85,27	61,78	20,50	85,25	64,75
		Meio	Al	261,38	394,56	255,98	122,28	497,66	375,38
			B	49,19	67,71	49,49	24,46	68,50	44,04
			Ca	2997,89	3523,90	3022,16	2132,10	3426,65	1294,55
			Cu	732,70	1091,76	720,89	460,38	1217,68	757,30
			Fe	597,64	984,30	585,59	257,31	1154,80	897,49
			K	710,86	808,05	710,55	577,67	849,58	271,91
			Mg	1454,33	2186,54	1455,55	608,46	2278,18	1669,72
			Mn	105,70	179,56	101,55	47,75	238,19	190,44
			Na	1716,40	1933,90	1706,28	1514,63	2100,45	585,82
			P	145,00	215,44	142,90	77,04	250,69	173,65
			Si	662,64	999,65	647,29	371,01	1230,39	859,38
			Zn	28,64	36,25	28,48	19,25	41,04	21,79
		Fim	Al	133,68	192,40	132,38	70,10	220,49	150,39
			B	47,96	54,38	47,76	41,79	57,71	15,92
			Ca	1837,39	2242,59	1841,22	1332,88	2272,95	940,07
			Cu	717,21	1303,88	672,12	397,62	1848,39	1450,77
			Fe	126,97	186,70	125,73	63,37	212,84	149,47
			K	903,10	1065,62	905,18	674,07	1094,71	420,64
			Mg	1802,39	2556,28	1809,67	804,74	2668,95	1864,21
			Mn	26,39	36,22	25,84	17,95	44,71	26,76
			Na	1710,51	2031,21	1703,64	1384,35	2160,35	776,00
			P	137,39	282,46	133,19	27,61	322,84	295,23
			Si	387,36	566,01	385,59	148,55	657,94	509,39
			Zn	46,13	61,86	46,49	23,48	62,21	38,73

Anexo E6 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *T. pluviosa* do sítio urbano

Espécie	Sítio	Posição	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior			
<i>T. pentaphylla</i>	Periurbano	Início	Al	209,99	369,05	203,88	67,53	462,29	394,76
			B	453,72	810,78	444,36	42,38	1033,58	991,20
			Ca	3035,84	3763,44	3068,73	1726,48	3753,15	2026,67
			Cu	343,94	554,04	337,41	159,55	645,99	486,44
			Fe	864,59	1433,85	861,69	227,61	1553,80	1326,19
			K	1867,88	2591,33	1876,84	948,43	2625,95	1677,52
			Mg	1069,07	1539,71	1050,58	654,84	1816,13	1161,29
			Mn	407,60	558,12	400,40	285,57	659,18	373,61
			Na	1332,43	1788,25	1321,29	865,45	1999,95	1134,50
			P	78,85	178,21	71,70	23,37	263,03	239,66
			Si	348,36	584,55	340,44	79,41	759,83	680,42
			Zn	18,61	26,79	18,62	9,46	27,62	18,16
		Meio	Al	125,82	173,99	126,90	54,94	177,25	122,31
			B	37,15	41,00	37,27	31,44	40,56	9,12
			Ca	1116,85	1248,43	1115,23	985,68	1277,15	291,47
			Cu	427,63	573,50	430,20	197,09	611,86	414,77
			Fe	68,69	84,36	68,66	48,29	89,50	41,21
			K	765,44	835,32	762,86	700,07	877,30	177,23
			Mg	634,86	777,50	641,98	389,24	752,29	363,05
			Mn	24,64	30,76	24,63	16,70	32,65	15,95
			Na	1305,69	1405,42	1305,12	1191,75	1429,83	238,08
			P	130,10	163,16	129,67	97,45	170,50	73,05
			Si	399,86	502,25	397,26	288,91	557,64	268,73
			Zn	22,06	33,10	21,75	12,17	37,52	25,35
		Fim	Al	100,26	164,75	98,34	33,69	201,47	167,78
			B	37,08	47,98	36,81	24,94	54,06	29,12
			Ca	1667,51	2381,45	1647,36	1008,86	2688,95	1680,09
			Cu	293,85	360,85	297,93	169,86	344,26	174,40
			Fe	27,86	48,84	27,55	7,48	53,79	46,31
			K	715,81	920,29	708,74	499,31	1059,56	560,25
			Mg	806,38	1291,46	784,65	337,89	1666,06	1328,17
			Mn	30,69	40,96	30,08	23,26	49,03	25,77
			Na	1412,88	1666,54	1425,81	1003,51	1589,53	586,02
			P	132,70	207,99	129,20	62,54	265,95	203,41
			Si	591,94	801,63	583,29	381,93	957,74	575,81
			Zn	52,90	80,38	52,05	23,35	97,73	74,38

Anexo E7 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *T. pluviosa* do sítio periurbano

Espécie	Sítio	Posição	Elemento	Média	Intervalo de confiança		Desvio padrão	Mínimo	Máximo
					Limite inferior	Limite superior			
<i>T. pentaphylla</i>	Rural	Início	Al	352,74	490,73	345,46	241,99	594,50	352,51
			B	206,04	260,85	205,03	144,12	286,17	142,05
			Ca	13693,38	17579,35	13703,58	9267,10	17936,00	8668,90
			Cu	640,97	831,67	626,12	540,58	1008,59	468,01
			Fe	1173,27	2047,58	1161,01	188,54	2378,70	2190,16
			K	2665,74	3843,44	2673,01	1136,48	4064,05	2927,57
			Mg	2283,66	2986,10	2304,73	1178,55	3009,53	1830,98
			Mn	412,76	587,56	416,82	128,24	624,25	496,01
			Na	2044,97	2673,64	2053,40	1133,95	2804,40	1670,45
			P	155,91	355,81	144,72	26,56	486,73	460,17
			Si	485,17	659,10	487,66	217,50	708,05	490,55
			Zn	284,06	432,29	287,49	57,75	448,73	390,98
		Meio	Al	73,44	84,68	73,75	56,20	85,19	28,99
			B	41,36	48,63	40,97	35,79	53,92	18,13
			Ca	1284,88	1544,15	1287,04	898,88	1632,13	733,25
			Cu	347,43	434,92	346,25	248,28	467,74	219,46
			Fe	97,61	199,12	91,52	27,23	277,48	250,25
			K	567,10	628,30	566,99	488,52	647,73	159,21
			Mg	555,86	768,71	549,71	347,14	875,36	528,22
			Mn	42,43	92,39	38,75	12,90	138,20	125,30
			Na	1125,60	1370,38	1134,19	715,31	1381,25	665,94
			P	77,42	116,19	76,76	35,33	131,31	95,98
			Si	162,07	217,47	163,06	96,80	209,61	112,81
			Zn	20,40	24,16	20,45	15,06	24,85	9,79
		Fim	Al	93,09	141,69	90,29	57,21	179,31	122,10
			B	38,74	43,11	38,93	31,96	42,12	10,16
			Ca	1493,03	2424,85	1437,82	793,57	3186,30	2392,73
			Cu	376,81	509,22	374,65	237,60	554,80	317,20
			Fe	78,72	143,10	74,20	36,10	202,60	166,50
			K	755,13	996,24	753,28	509,69	1034,02	524,33
			Mg	1028,52	1823,99	986,75	381,38	2427,53	2046,15
			Mn	28,30	40,37	27,61	18,93	49,96	31,03
			Na	1050,38	1177,15	1047,79	926,52	1220,98	294,46
			P	144,48	277,14	139,33	52,56	328,96	276,40
			Si	133,23	201,23	130,88	72,21	236,52	164,31
			Zn	20,18	25,62	20,04	14,77	28,13	13,36

Anexo E8 – Estatística descritiva da análise das intensidades das linhas de emissão (u.a) de macro e micronutrientes nas diferentes porções do lenho das árvores de *T. pluviosa* do sítio rural