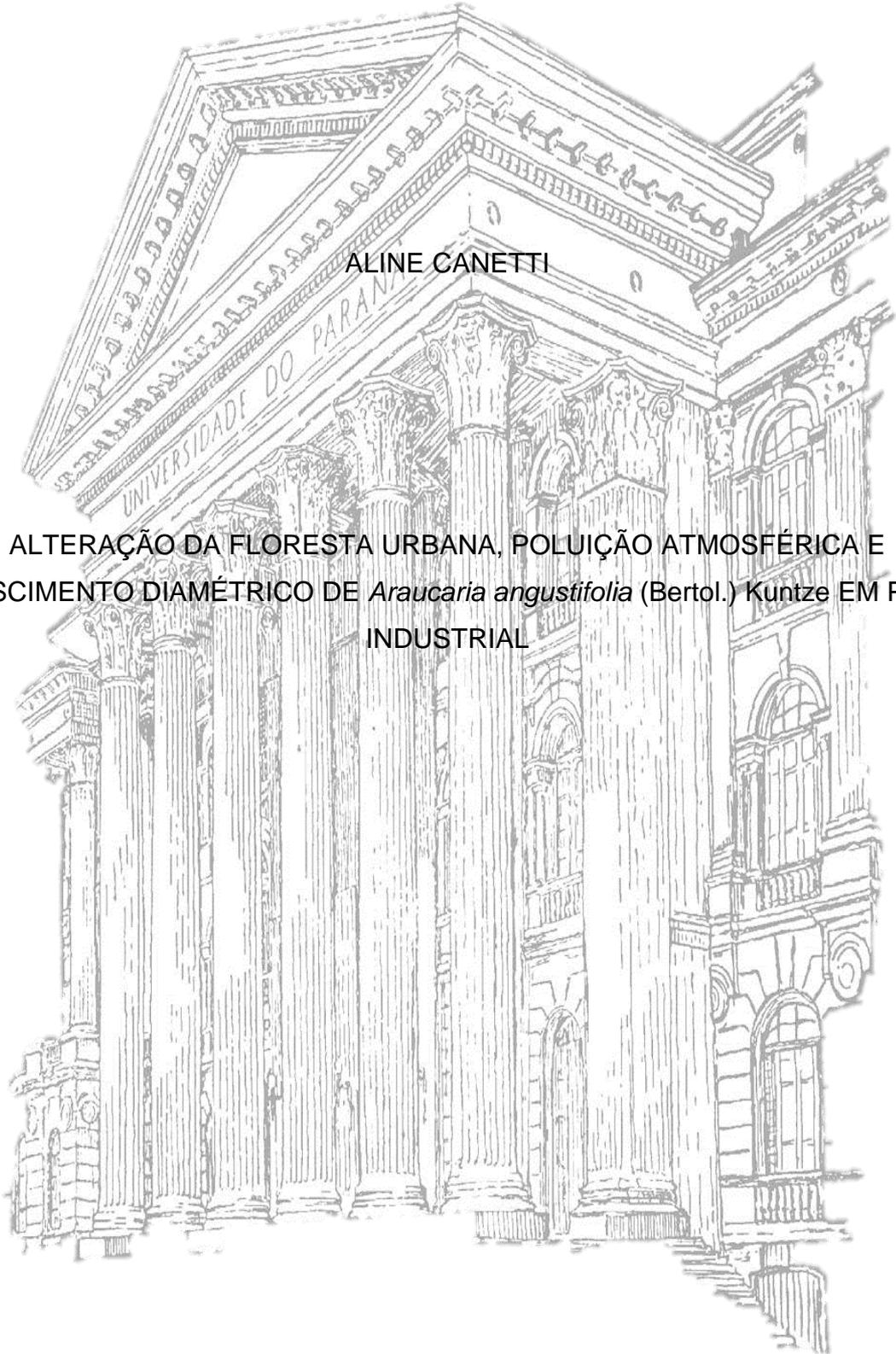


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALINE CANETTI

ALTERAÇÃO DA FLORESTA URBANA, POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E
CRESCIMENTO DIAMÉTRICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM POLO
INDUSTRIAL



CURITIBA

2015

ALINE CANETTI

ALTERAÇÃO DA FLORESTA URBANA, POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E
CRESCIMENTO DIAMÉTRICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM POLO
INDUSTRIAL

Dissertação apresentada como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Co-Orientadores: Dr. Evaldo Muñoz Braz

Dra. Patrícia Póvoa de Mattos

CURITIBA

2015

Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR
Ficha catalográfica elaborada por Marilene do Rocio Veiga – CRB 424/PR

Canetti,Aline

Alteração da floresta urbana, poluição atmosférica e crescimento diamétrico de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em polo industrial / Aline Canetti. – 2015

101 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto

Co-orientadores: Dr. Evaldo Muñoz Braz

Dr^a Patrícia Póvoa de Mattos

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 26/02/2015.

Área de concentração: Manejo florestal

1. Ar - Poluição. 2. Plantas - Efeito da poluição do ar. 3. Florestas urbanas. 4. Florestas urbanas - Araucária(PR). 5. Dendrocronologia. 6. Teses. I. Péllico Netto, Sylvio. II. Braz, Evaldo Muñoz. III. Mattos, Patrícia Póvoa de. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.42

PARECER

Defesa nº. 1093

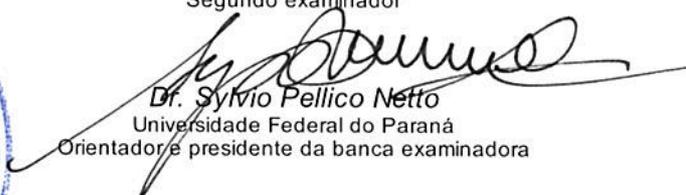
A banca examinadora, instituída pelo colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, após argüir o(a) mestrando(a) *Aline Canetti* em relação ao seu trabalho de dissertação intitulado "**ALTERAÇÃO DA FLORESTA URBANA, POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA E CRESCIMENTO DIAMÉTRICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM POLO INDUSTRIAL**", é de parecer favorável à APROVAÇÃO do(a) acadêmico(a), habilitando-o(a) ao título de Mestre em Engenharia Florestal, área de concentração em MANEJO FLORESTAL.



Dr. Randolph Zachow
Serviço Florestal Brasileiro
Primeiro examinador



Dr. Ana Paula Dalla Corte
Universidade Federal do Paraná
Segundo examinador



Dr. Sylvio Pellico Netto
Universidade Federal do Paraná
Orientador e presidente da banca examinadora

Curitiba, 26 de fevereiro de 2015.



Antonio Carlos Batista
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal

Aos meus pais Ronaldo e Clades e ao meu irmão Gustavo,
por serem meu porto seguro.

Aos meus anjinhos no céu, Débora Weber e Luiz Felipe
“Gaivota” (*in memoriam*), que se foram cedo demais.

DEDICO.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus, por ter-me dado o dom da vida e com ele as grandes oportunidades;

À Universidade Federal do Paraná, à Pós-Graduação em Engenharia Florestal e aos professores da Engenharia Florestal, pela oportunidade de estudar nessa instituição que tantos aprendizados me proporcionou;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e à Embrapa Florestas pela disponibilização de suas dependências para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Sylvio Péllico Netto, que sempre se mostrou disposto a auxiliar durante todo o período do meu mestrado e pela excelente orientação;

À prefeitura Municipal de Araucária e à Secretaria Municipal do Meio Ambiente de Araucária, por autorizar a coleta das amostras das árvores e pelo esclarecimento de dúvidas acerca do município;

Ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP), por ceder os dados de monitoramento da qualidade do ar e ao Paranacidades por fornecer imagens de satélite do município de Araucária, PR;

À LACTEC e, especialmente ao químico Eliseu Esmanhoto, por compartilhar seus conhecimentos acerca do monitoramento da poluição do ar;

Aos técnicos que tornaram possível a coleta dos dados e preparação das amostras Paulino, Wilson, João, e, especialmente ao Jonatas Gueller, por tornar os momentos, ainda que difíceis, muito divertidos;

Às pesquisadoras Marilice Garrastazu, pela total disponibilidade em auxiliar com os conhecimentos em Sensoriamento Remoto, e Elenice Fritzsos pelo auxílio na análise multivariada dos dados;

Aos funcionários da Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Reinaldo e David, por serem tão solícitos sempre que necessitei;

Às pessoas que contribuíram indicando contatos importantes para a execução deste trabalho, em especial aos pesquisadores Renato Penteadó e Antônio Maciel;

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Rafaella, Mariana, Andreia, Camila, Maíra, Vitor, Aurélio, Luciellen, Janaína, Pollyni, Roger e Alessandro, que contribuíram

para a realização deste e de tantos outros trabalhos, pela companhia e por ajudarem sempre;

Aos amigos florestais e não florestais, do Santa Maria, do CEFET, do GE Marechal Rondon e “agregados”, do Chile e, especialmente aos amigos Lucas, Paula, Isabela e Manoela, pelos momentos de descontração e pelo apoio emocional, por estarem sempre ao meu lado e serem parte essencial do meu caminho;

À minha família, especialmente meus pais Ronaldo e Clades, a quem devo tudo o que sou hoje, e ao meu irmão Gustavo; por terem sempre me apoiado nas minhas decisões e contribuído com minhas conquistas e por terem me proporcionado ótimas condições de estudo;

Por fim, agradeço aos pesquisadores Patrícia Póvoa de Mattos e Evaldo Muñoz Braz, por serem minha inspiração e orientação profissional e pessoal, por estarem disponíveis em todos os momentos que precisei, pelos conselhos e por abrirem tantas portas para o meu futuro. Obrigada por serem minha família na Embrapa e por me ensinarem a acreditar na Engenharia Florestal e a lutar por um mundo melhor.

“A natureza não se domina, senão obedecendo-lhe.”

Francis Bacon

RESUMO

O controle da poluição do ar é tema para imediata preocupação entre os pesquisadores, uma vez que seus efeitos negativos são crescentes e cumulativos. A dendrocronologia aplicada a estudos de poluição em áreas urbanas e industriais se mostra muito apropriada para recuperação do histórico nesses ambientes e embasamento para que os gestores consigam minimizar os efeitos nocivos das fontes poluidoras, implantando e/ou manejando áreas florestais urbanas. O objetivo deste trabalho foi quantificar as áreas florestais e caracterizar o crescimento diamétrico de espécies arbóreas em área urbana sob diferentes condições de poluição atmosférica, tendo como estudo de caso a espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze no município de Araucária, PR. Inicialmente, foi determinado o avanço da antropização sobre as áreas florestais no município entre 2005 e 2012 com a utilização de imagens de alta resolução espacial (5 m). Para estudo do crescimento, foram selecionadas e georreferenciadas árvores adultas em 4 locais com diferentes características de uso do solo. Foram medidos o diâmetro e a altura e coletadas amostras não destrutivas a 1,30 m do solo (SISBIO 37679). As séries de crescimento das árvores foram medidas e datadas. A comparação entre concentrações de poluentes e variações meteorológicas no município foi feita utilizando-se os dados horários de monitoramento da qualidade do ar fornecidos pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP). Houve decréscimo de 10,7% de florestas urbanas entre 2005 e 2012, com redução mais intensa nas zonas residencial e industrial. O inverno é o período do ano com maior concentração de poluentes na troposfera. Foram encontrados 3 padrões de distribuição da concentração de poluentes ao longo do dia, não sendo observados níveis críticos acima dos limites determinados pela legislação brasileira. Quando considerada a concentração de poluentes ao longo dos anos por estação de monitoramento do ar observou-se diferenciação entre os quatro locais de estudo. É possível observar redução gradativa de crescimento com o passar dos anos, exceto na região com características rurais. Aparentemente, as árvores de menores dimensões responderam negativamente ao ambiente antropizado, tendo apresentado curvas de crescimento inferiores às das árvores das outras classes diamétricas. Os poluentes SO₂ e NO interferiram significativamente no crescimento das árvores de 20 a 60 cm de diâmetro. O crescimento das árvores de maiores dimensões não foi correlacionado significativamente com nenhuma variável testada. Com modelos de regressão linear múltipla, foi possível explicar 27,3% e 17,5% do incremento anual médio relacionado às concentrações de SO₂ e o NO para as classes diamétricas de 20 a 40 cm e de 40 a 60 cm, respectivamente. *A. angustifolia* é indicada para o plantio nas áreas antropizadas, pois é uma espécie longeva que sofre pouca influência das injúrias geradas pela poluição a níveis controlados, sendo seu crescimento pouco prejudicado.

Palavras-chaves: Poluição industrial; dendrocronologia; manejo florestal.

ABSTRACT

Air pollution management is a subject of immediate concern for the populations, once its increasing adverse effects are cumulative. Dendrochronology applied to pollution studies in urban and industrial areas have shown to be a very suitable approach for the recovery of the historical progress of these sites, as a guideline to minimize the harmful effects of pollution sources, implementing and/or managing urban green areas. The main objective of this study was to quantify urban forests and to characterize the diameter growth of tree species in urban areas under different conditions of air pollution, taking the species *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze as a case study in the municipality of Araucaria, an industrial area in Southern Brazil. At first, it was determined the advancement of human disturbance on forest remnants in Araucaria between the years of 2005 and 2012 with the use of high resolution images (5 m). For the growth study, thirty-five trees were selected from each study site and non-destructive samples (authorization 37679/SISBIO) were collected for generating annual growth series. We used data from air quality monitoring provided by the Instituto Ambiental do Paraná (IAP) for the comparison of pollutant concentrations and meteorological variations in the area. There was an urban forests area decrease of 10.70% between 2005 and 2012, more intense in the residential and industrial areas. The air pollution level is acceptable under Brazilian law. Throughout the day were found 3 distribution patterns of concentration of pollutants. Winter is the time of year with the highest concentration of pollutants in the troposphere. The distribution of the pollutants over the years by the air monitoring station were grouped. There was gradual reduction of growth over the years in all study sites except in the region with rural characteristics. The smaller trees apparently responded negatively to the anthropic environment, with growth curves below of the other diameter classes curves. Pollutants that significantly interfere in the growth of trees from 20 to 60 cm diameter were SO₂ and NO. The growth of larger trees were not significantly correlated with any variable tested. With multiple linear regression models, we could explain 27.3% of the average annual increase related to the concentrations of SO₂ and NO of the diameter class 20-40 cm and 17.5% of the diameter class 40-60 cm. The municipality should note the replacement and insertion of new-forested areas, since the situation of pollution is especially aggravated by the presence of large number of industries and high population growth. *A. angustifolia* is suitable for planting in disturbed areas, as it is a long-lived species that suffers little influence of the injuries generated by controlled levels of pollution on its growth.

Keywords: Industrial pollution; dendrochronology; forest management.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR, E ZONEAMENTO URBANO ...	41
FIGURA 2 - EXEMPLIFICAÇÃO DA COLETA DE AMOSTRAS DE TREINAMENTO PARA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DO USO DO SOLO DE ARAUCÁRIA, PR	44
FIGURA 3 - EXEMPLIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA PARA TESTES DE ACÚRACIA DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA	45
FIGURA 4 - ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS DE MONITORAMENTO DO AR EM ARAUCÁRIA, PR	47
FIGURA 5 - MAPA DOS POLÍGONOS DAS ÁREAS DE COLETA DE AMOSTRAS, NOS ENTORNOS DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR (AMARELO), ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DO AR (VERDE) E ÁRVORES AMOSTRADAS (VERMELHO) EM ARAUCÁRIA, PR	50
FIGURA 6 - MAPA DA QUANTIFICAÇÃO DE FLORESTAS ENTRE OS ANOS DE 2005 E 2012 NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	59
FIGURA 7 - VALORES MÉDIOS ANUAIS DE TEMPERATURA E UMIDADE ENTRE OS ANOS DE 2003 E 2012 NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	63
FIGURA 8 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS HORÁRIAS DOS POLUENTES DO AR ENTRE OS ANOS DE 2003 E 2012 NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	64
FIGURA 9 - CONCENTRAÇÃO RELATIVA DOS POLUENTES DO AR POR ESTAÇÃO DO ANO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	67
FIGURA 10 - PADRÃO DE CONCENTRAÇÃO RELATIVA DOS POLUENTES DO AR DISTRIBUÍDO POR ANÁLISE CLUSTER NAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	68

FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO DE <i>A. angustifolia</i> BEM DEMARCADOS (A) E TRECHOS DE MENOR DISTINÇÃO (B) EM ÁREA URBANA	69
FIGURA 12 - TENDÊNCIAS LINEARES DOS CRESCIMENTOS DIAMÉTRICOS DE <i>A. angustifolia</i> MENSURADOS POR LOCAL DE ESTUDO E GERAL	72
FIGURA 13 - BOX PLOT DA IDADE EM FUNÇÃO DA CLASSE DIAMÉTRICA DAS ÁRVORES DE <i>A. angustifolia</i> EM ARAUCÁRIA, PR	73
FIGURA 14 - MODELOS DE GOMPERTZ ELABORADOS PARA OS LOCAIS DE ESTUDOS POR CLASSES DIAMÉTRICAS. OS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS E COEFICIENTES DOS MODELOS SE ENCONTRAM NA TABELA 17	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CRITÉRIOS PARA EPISÓDIOS AGUDOS DE POLUIÇÃO DO AR (RESOLUÇÃO CONAMA N°03/90, SEMA N° 054/06)	25
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS UTILIZADAS NO PRESENTE TRABALHO	43
TABELA 3 - CLASSES DE USO DE SOLO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR, E DESCRIÇÃO DE SEUS ATRIBUTOS PREDOMINANTES	44
TABELA 4 - DESCRIÇÃO DAS QUATRO ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO AMBIENTAL NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	46
TABELA 5 - NÚMERO DE DIAS ANALISADOS POR POLUENTE ATMOSFÉRICO E VARIÁVEL METEOROLÓGICA	47
TABELA 6 - DADOS DENDROMÉTRICOS DE <i>A. angustifolia</i> COLETADOS NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	51
TABELA 7 - CARACTERIZAÇÃO DO CRESCIMENTO DAS ÁRVORES AMOSTRADAS POR CLASSE DIAMÉTRICA E POR LOCAL DE ESTUDO	53
TABELA 8 - EQUAÇÕES DE CRESCIMENTO DIAMÉTRICO TESTADAS EM FUNÇÃO DA IDADE	54
TABELA 9 - MATRIZ DE CONFUSÃO E COEFICIENTES ESTATÍSTICOS DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DAS IMAGENS SPOT, DO ANO DE 2005	56
TABELA 10 - MATRIZ DE CONFUSÃO E COEFICIENTES ESTATÍSTICOS DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DAS IMAGENS RAPIDEYE, DO ANO DE 2012	57
TABELA 11 - QUANTIFICAÇÃO DAS DISTINTAS ÁREAS DE USO DO SOLO NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA	58
TABELA 12 - ÁREAS COM PREDOMÍNIO DE VEGETAÇÃO ARBÓREA POR CLASSES DE USO DO SOLO, SEGUNDO ZONEAMENTO URBANO (PARANÁ, 2010)	60

TABELA 13 -LIMITES DE CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES NO AR ESTIPULADOS PARA O BRASIL, ESTADOS UNIDOS E EUROPA	62
TABELA 14 -PERCENTUAL DE HORAS COM VALORES ACIMA DOS NÍVEIS CRÍTICOS DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES DO AR NO PERÍODO DE 2003 A 2013 CONSIDERANDO CRITÉRIOS DO BRASIL, ESTADOS UNIDOS E UNIÃO EUROPEIA	62
TABELA 15 -DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DAS SÉRIES CRONOLÓGICAS MENSURADAS NOS LOCAIS DE ESTUDO	71
TABELA 16 -PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE GOMPERTZ DAS ÁRVORES AMOSTRADAS POR CLASSE DIAMÉTRICA E POR LOCAL DE ESTUDO	74
TABELA 17 -ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO DE GOMPERTZ DAS ÁRVORES AMOSTRADAS POR CLASSE DIAMÉTRICA E POR LOCAL DE ESTUDO	75
TABELA 18 -CORRELAÇÃO DE PEARSON DOS INCREMENTOS POR CLASSE DIAMÉTRICA COM MÉDIAS ANUAIS DE TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS	80
TABELA 19 -MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DO INCREMENTO DIAMÉTRICO ANUAL EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES SIGNIFICATIVAMENTE CORRELACIONADOS	82

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVO	18
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	19
3.1.1	Óxidos de nitrogênio (NO _x)	20
3.1.2	Óxidos sulfúricos (SO _x)	21
3.1.3	Material particulado	21
3.1.4	Ozônio (O ₃)	22
3.1.5	Monóxido de carbono (CO)	23
3.2	MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO	24
3.3	FLORESTA URBANA	25
3.3.1	Os benefícios	25
3.3.2	A arborização em áreas industriais	27
3.3.3	Dificuldades relacionadas à vegetação urbana	28
3.4	A FLORESTA E A POLUIÇÃO DO AR	29
3.5	EFEITOS DOS POLUENTES AÉREOS NAS PLANTAS	30
3.6	MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO PELA FLORESTA	31
3.7	CRESCIMENTO ARBÓREO E MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO POR DENDROCRONOLOGIA	33
4	MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1	ÁREA DE ESTUDO	40
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA FLORESTAL DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	42
4.2.1	Imagens	42
4.2.2	Classificação das imagens	43
4.2.3	Teste de acurácia da classificação	45
4.2.4	Quantificação das áreas classificadas	46
4.3	ANÁLISE TEMPORAL DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	46

4.4	DIAGNÓSTICO DE CRESCIMENTO DE <i>A. angustifolia</i> SUJEITA À POLUIÇÃO EM POLO INDUSTRIAL	49
4.4.1	Escolha da espécie	49
4.4.2	Áreas amostradas	49
4.4.3	Coleta de dados dendrométricos	50
4.4.4	Coleta, medição e datação das amostras não destrutivas	51
4.4.5	Análise do crescimento	52
4.4.6	Resposta às variáveis ambientais	54
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA FLORESTAL DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR	56
5.1.1	Acurácia da classificação supervisionada	56
5.1.2	Caracterização das áreas florestais do município	58
5.2	ANÁLISE TEMPORAL DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	61
5.3	DIAGNÓSTICO DE CRESCIMENTO DE <i>A. angustifolia</i> SUJEITA À POLUIÇÃO EM POLO INDUSTRIAL	69
5.3.1	Estudo dendrocronológico	69
5.3.2	Análise do crescimento	71
5.4	RESPOSTA ÀS VARIÁVEIS AMBIENTAIS	80
6	CONCLUSÕES	85
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87

1 INTRODUÇÃO

Há um crescente reconhecimento de que as florestas urbanas melhoram a qualidade de vida urbana em muitos aspectos, fornecendo benefícios para atender às necessidades locais (KÜCHELMEISTER, 2000), pois a floresta, pelo processo fisiológico das árvores, exerce a filtragem do ar e tem influência direta na temperatura e em outras variáveis climáticas, determinantes na dispersão de poluentes emitidos na atmosfera (MURPHY, 1977; LIMA, 1980; BRACK, 2002; WALTON *et al.*, 2008). Portanto, a preservação da floresta nos polos urbanizados é fundamental.

O monitoramento de superfícies vegetadas, especialmente em áreas urbanizadas, é dificultado pela grande variação de uso do solo desses locais (MYEONG *et al.*, 2001; WEBER; PUISSANT, 2003). Com o avanço da tecnologia, cada vez mais são utilizadas imagens provenientes de satélites como alternativas para monitorar áreas extensas, pois as imagens são ferramentas de monitoramento bastante efetivas para analisar superfícies em escalas abrangentes (WALTON *et al.*, 2008; MYINT *et al.*, 2011; SEXTON *et al.*, 2013).

O monitoramento e a reversão de níveis críticos de poluição atmosférica em polos industriais são políticas implementadas em diversos países há muitos anos (HAAS, 1989; MAGE *et al.*, 1996; VARELA, 2001). Ainda assim, aprimorar o monitoramento e os inventários de emissões de poluentes industriais é uma necessidade imediata, pois esses são dados essenciais para o controle da poluição do ar com intuito de minimizar danos à saúde pública (MAGE *et al.*, 1996; DANNI-OLIVEIRA, 2008).

Muitos trabalhos mostram o efeito negativo da concentração de poluentes atmosféricos para a saúde humana (POPE III, 1989; BRUNEKREEF; HOLGATE, 2002; KAMPA; CASTANAS, 2008; DANNI-OLIVEIRA, 2008; MALIK *et al.*, 2012). No entanto, ainda existe uma carência de informação sobre os riscos ambientais desses focos de poluição nas áreas florestais do entorno (MCLAUGHLIN, 1985; BUSSOTTI; FERRETTI, 1998; SERENGIL *et al.*, 2011). O entendimento do crescimento de espécies florestais sujeitas a diferentes níveis de poluição do ar permitirão entender o papel dessas áreas florestais como mitigadoras em áreas mais críticas (BRACK, 2002; SERENGIL *et al.*, 2011; MALIK *et al.*, 2012) e para o planejamento da expansão de áreas urbanas (KONIJNENDIJK *et al.*, 2007).

No Brasil, monitoramentos em longo prazo de poluentes atmosféricos em áreas industriais ainda são escassos. A região metropolitana de Curitiba se destaca pela implementação de inovações para garantia da qualidade ambiental. Desde a década de 1980, conta com estações automáticas e manuais, constituindo uma rede de monitoramento que possibilita a real avaliação das condições da qualidade do ar em Curitiba e região metropolitana (DANNI-OLIVEIRA, 2008; IAP, 2011, 2012).

O município de Araucária foi escolhido para o presente projeto, pois teve sua urbanização bastante acentuada, principalmente após a década de 1970, quando houveram incentivos do governo estadual para a formação de um polo industrial na região, por sua localização estratégica (NEGRELLI, 2004; SILVA, 2006; SOUZA, 2006; TADANO, 2007). O município conta com dados de monitoramento do ar, que iniciou após pressão exercida pelos moradores sobre a exacerbada poluição ambiental produzida pelo polo industrial (SOUZA, 2006).

A dendrocronologia é uma ferramenta com grande potencial para o entendimento do efeito da poluição no crescimento das florestas, pois permite recuperar as informações referentes a padrões ambientais ao longo do crescimento das árvores (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002; WILCZYNSKI, 2006; MUSIKA *et al.*, 2004; MALIK *et al.*, 2012). Para este trabalho, foi selecionada a *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, uma espécie que, devido à restrição de corte por estar ameaçada de extinção (IAP, 2008; MMA, 2008), tem ampla ocorrência na região metropolitana de Curitiba, podendo ser encontrados indivíduos com séries longas de crescimento. Além disso, seu potencial dendrocronológico já foi comprovado por diversos autores (SEITZ; KANNINEN, 1989; MATTOS *et al.*, 2007a, 2007b, 2010; HESS *et al.*, 2009; SANTAROSA *et al.*, 2007).

Esta proposta pretende quantificar os remanescentes florestais e caracterizar o ritmo de crescimento de *A. angustifolia* submetida a diferentes condições de poluição atmosférica no município de Araucária. Essas informações permitirão inferir sobre a dinâmica das florestas em áreas urbanas próximas a polos industriais e servirão de base para elaboração de propostas de manejo florestal e instalação de novos plantios em outros locais com condições semelhantes.

2 OBJETIVO

Quantificar as áreas florestais e caracterizar o crescimento diamétrico de espécies arbóreas em área urbana sob diferentes condições de poluição atmosférica, tendo como estudo de caso a espécie *A. angustifolia* no município de Araucária, PR.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Avaliar a diferença em área dos remanescentes florestais no município de Araucária, PR, entre os anos de 2005 e 2012;
- b) Analisar a evolução temporal e os períodos críticos das variáveis meteorológicas e concentrações de poluentes do ar;
- c) Avaliar o crescimento de *A. angustifolia* submetida a diferentes níveis de poluição do ar;
- d) Correlacionar o crescimento de *A. angustifolia* com as concentrações de poluentes industriais, utilizando as séries históricas dos anéis de crescimento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

Poluente atmosférico é 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: a) impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; b) inconveniente ao bem-estar público e; c) danoso aos materiais, à fauna e à flora (CONAMA, 1990).

A poluição do ar envolve uma sequência de eventos desde sua geração na fonte emissora, seu transporte e transformação na atmosfera, sua remoção e os efeitos sobre os seres humanos, materiais e ecossistemas. Como é inviável ou tecnicamente impossível cessar as emissões de poluentes atmosféricos, é necessário minimizar as emissões a um nível tal que os efeitos sejam não danosos (FLAGAN; SEINFELD, 1988).

A poluição regional é localizada na camada mais baixa da atmosfera, a troposfera, que se estende desde a superfície da Terra até cerca de 16 km de altitude, onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos. Como a distribuição da emissão de poluentes não é uniforme na troposfera, é nas grandes cidades em que estão concentrados os problemas a ela relacionados (CHEREMISINOFF, 2002).

Nas grandes cidades ocorre o fenômeno conhecido por inversão térmica, em que uma camada de ar mais frio fica prensada junto ao solo por uma camada de ar mais quente, localizada acima dela. Quando isso ocorre, cessa a mistura entre camadas de ar e os poluentes ficam presos na camada inferior de ar frio, gerando o denominado fenômeno *Smog*. O *Smog* é acompanhado pela chuva ácida, que é a deposição de ácidos provenientes de compostos poluentes do ar sobre a superfície terrestre (CHEREMISINOFF, 2002).

A Resolução do CONAMA nº 03/90 define como: a) padrões primários de qualidade do ar: concentrações de poluentes que quando ultrapassadas poderão afetar a saúde da população e; b) padrões secundários de qualidade do ar: concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais

e ao meio ambiente em geral. Os padrões de qualidade do ar definidos para os poluentes atmosféricos são: partículas totais em suspensão (PTS), fumaça, partículas inaláveis (PI), dióxido de enxofre (SO_2), monóxido de carbono (CO), ozônio (O_3) e dióxido de nitrogênio (NO_2).

A seguir, será feita uma descrição dos principais poluidores do ar mensurados pela rede de monitoramento da qualidade do ar da região metropolitana de Curitiba do Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

3.1.1 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

O óxido nítrico (NO) é um gás tóxico incolor e inodoro, que é facilmente convertido em um gás mais prejudicial, o dióxido de nitrogênio (NO_2). O NO_2 possui coloração castanho-avermelhada, odor pungente e propriedades corrosivas (FLAGAN; SEINFELD, 1988; CHEREMISINOFF, 2002).

Apenas cerca de 10% das emissões de NO_x são provenientes de fontes antropogênicas. Processos biológicos anaeróbios no solo e na água produzem o restante, por raios e atividades vulcânicas, e pela destruição fotoquímica de compostos de nitrogênio na atmosfera. As duas maiores fontes antropogênicas de NO_x são a combustão automotiva e a geração de energia por combustíveis fósseis. Em menores quantidades, os processos industriais, como uso de caldeiras, incineradores e fabricação de produtos químicos nitrogenados, além das operações agrícolas, que também produzem esses óxidos (FLAGAN; SEINFELD, 1988; CHEREMISINOFF, 2002).

Estima-se que sejam emitidos anualmente 50 milhões de toneladas de óxidos de nitrogênio provenientes de fontes antropogênicas. Esses óxidos são precursores da chuva ácida e adições de ozônio na atmosfera, ambos prejudiciais aos seres vivos. Os nitratos presentes na precipitação podem aumentar o crescimento da floresta em solos deficientes de nitrogênio, mas a lixiviação de potássio, magnésio, cálcio e outros nutrientes dos solos florestais pode contrabalançar o efeito fertilizante de nitratos e sulfatos (CHEREMISINOFF, 2002). A extensão e a gravidade do dano nas plantas, atribuídas à precipitação ácida, são difíceis de serem estimadas, pois dependem do tipo de solo, espécies, condições atmosféricas e outros fatores naturais.

3.1.2 Óxidos sulfúricos (SO_x)

O SO₂ (dióxido de enxofre) é um gás incolor de odor pungente e desagradável, altamente solúvel em água. É formado a partir da oxidação do enxofre contido em combustíveis, bem como a partir de certos processos industriais que utilizam compostos contendo enxofre. Emissões antrópicas de SO₂ são provenientes quase exclusivamente de fontes fixas de poluição, caldeiras, aquecedores e fornos. Combustões estacionárias (principalmente de indústrias) e processos industriais (como a fundição) são as principais fontes de SO₂ (FLAGAN; SEINFELD, 1988). Usinas termoelétricas que queimam carvão ou óleo com altos teores de enxofre são geralmente as principais fontes de emissões antropogênicas de SO₂, seguidas de caldeiras industriais e fundição de metais não-ferrosos. Emissões provenientes de veículos também podem contribuir para aumento nas concentrações do óxido no ar (CHEREMISINOFF, 2002).

A exposição de SO₂ no ar é associada com a redução da função pulmonar em seres humanos, além de aumentar a incidência de doenças respiratórias, irritação nos olhos, nariz e garganta e até morte prematura, sendo jovens e idosos os mais afetados. A vegetação também pode ser atingida, ocasionando perda de folhagem, redução na produção e morte prematura. As plantas nas imediações das fontes de emissões são mais vulneráveis aos sintomas (CHEREMISINOFF, 2002).

3.1.3 Material particulado

Material particulado é composto por partículas transportadas pelo ar e emitidas sob a forma condensada (líquida ou sólida), que podem ser uma mistura complexa de compostos orgânicos e inorgânicos, caracterizados por seus atributos físicos que influenciam seu transporte e deposição. Esses atributos são a concentração em massa de ar e tamanho das partículas. Os níveis ambientais de concentração são medidos em microgramas por metro cúbico de ar (mg m⁻³) e o tamanho geralmente em diâmetro aerodinâmico. As partículas totais suspensas (PTS) têm diâmetro aerodinâmico superior a 2,5 µ e são definidas como partículas grossas, enquanto as

que são menores a $2,5 \mu$ são chamadas de partículas finas ou inaláveis (CHEREMISINOFF, 2002).

Quase todas as partículas finas são geradas como resultado de processos de combustão, incluindo a queima de combustíveis fósseis para a geração de vapor, aquecimento e consumo doméstico, a queima de campo agrícola, motor a combustão movido a diesel, e vários processos industriais. As emissões destas fontes antropogênicas tendem a estar em frações finas. No entanto, alguns processos industriais e outros que produzem grandes quantidades de poeira, como a fabricação de cimento, mineração, britagem de pedra, e moagem de farinha, tendem a gerar partículas maiores que 1 mm e, principalmente, maiores do que $2,5 \text{ mm}$. Alguns processos agroindustriais e tráfego rodoviário representam fontes antropogênicas adicionais de emissões de partículas, principalmente grossas. As maiores fontes fixas de emissões de partículas incluem combustíveis fósseis das usinas térmicas, processos metalúrgicos e fabricação de cimento. A composição física e química das emissões de partículas é determinada pela natureza das fontes de poluição (CHEREMISINOFF, 2002).

O sistema respiratório é a principal via de entrada para as partículas em suspensão no ar. A deposição de partículas em diferentes partes do sistema respiratório humano depende do tamanho da partícula, forma, densidade e padrões de respiração individuais. O efeito sobre o organismo humano é também influenciado pela composição química das partículas, a duração da exposição e a susceptibilidade individual (CHEREMISINOFF, 2002).

3.1.4 Ozônio (O_3)

O O_3 ocorre naturalmente na estratosfera (camada entre 16 e 50 km de altitude), formando uma camada protetora que absorve o comprimento de onda da radiação solar, conhecido como ultravioleta B (UVB), que pode danificar moléculas de ácido desoxirribonucleico (DNA) em humanos e aumentar os riscos de câncer. Porém, a mesma molécula atua como poluente, quando presente em níveis inferiores da atmosfera em nevoeiro urbano. É um gás oxidante incolor e reativo, formado na troposfera pela reação fotoquímica da luz solar com óxidos de nitrogênio, facilitada

por uma variedade de compostos orgânicos voláteis (VOCs). Suas concentrações são influenciadas pela intensidade da radiação solar e concentrações absolutas de NO e VOCs. Ocorrem variações diurnas e sazonais em resposta a mudanças na luz solar, apresentando médias mais altas geralmente durante o verão (CHEREMISINOFF, 2002).

A principal preocupação para a saúde quanto à exposição ao O₃ na troposfera é o seu efeito sobre o sistema respiratório, especialmente sobre a função pulmonar. Vários fatores influenciam estes impactos na saúde, incluindo as concentrações de O₃ no ar, a duração da exposição, o volume médio de ar respirado por minuto (taxa de ventilação), bem como a duração dos intervalos entre as exposições de curto prazo. Podem haver riscos também no desenvolvimento de plantas, especialmente as de crescimento lento e vida longa, causando queda das folhas e mudança em sua coloração. Além de danos fisiológicos, o O₃ troposférico pode causar resistência reduzida a fungos, bactérias, vírus e insetos, reduzindo o crescimento e inibindo a produção e reprodução. Esses impactos sobre as espécies sensíveis podem resultar em redução na qualidade das culturas agrícolas e da biodiversidade em ecossistemas naturais (CHEREMISINOFF, 2002).

3.1.5 Monóxido de carbono (CO)

O CO é um gás incolor e inodoro, inflamável, tóxico e levemente solúvel em água. É proveniente principalmente da queima de combustíveis fósseis, da oxidação de metano e de outros hidrocarbonetos biogênicos na atmosfera (FLAGAN; SEINFELD, 1988). É estimado que aproximadamente dois terços do CO seja proveniente de atividades antropogênicas. A concentração máxima ocorre geralmente na primavera e a mínima no final do verão ou início do outono (SEINFELD; PANDIS, 2012).

3.2 MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO

Devido aos efeitos prejudiciais, se faz imprescindível a realização do monitoramento da poluição ambiental, que cresce com o aumento populacional, afetando a saúde e economia mundiais. O monitoramento é dificultado pelos elevados custos com equipamentos de registro de concentrações de poluentes além da grande quantidade de substâncias emitidas e a dificuldade da compreensão dos efeitos sinérgicos que ocorrem entre elas, por apresentarem alta variação espaço-temporal (MUDD; KOZLOWSKI, 1975; MCLAUGHLIN, 1985; NIMIS *et al.*, 2000).

Por diversas razões, é necessário definir de níveis de referência de poluentes em um ecossistema quando feito um monitoramento biológico para avaliar o estado de conservação e/ou degradação. É também importante prever a incidência de possíveis consequências das atividades humanas futuras, para estabelecer intervenções necessárias e controlar a evolução no tempo (CONTI; CECCHETTI, 2001).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) é o órgão brasileiro deliberativo que, vinculado ao Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), dispõe sobre normas de monitoramento e controle da poluição do ar e os padrões de qualidade a serem seguidos. A Resolução n. 003 de 1990 regulamenta concentrações de PTS, fumaça, PI, SO₂, CO, O₃ e NO₂, que são os parâmetros indicadores da qualidade do ar considerados legalmente.

No Estado do Paraná, os padrões de qualidade do ar são definidos pela Portaria da Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná (SEMA) n. 2/81, que segue os parâmetros indicados pelo CONAMA, além de indicar outras providências com relação às emissões industriais. No Estado, o IAP é a instituição executiva responsável pelos aspectos legais e institucionais de controle de qualidade do ar. Atualmente, o IAP possui 12 estações de monitoramento da qualidade do ar na região metropolitana de Curitiba (RMC), sendo 7 automáticas. Através de uma política aberta de transparência, o Instituto disponibiliza diariamente em meio eletrônico dados diários, registrados pelas estações de monitoramento, dos índices de qualidade do ar (IQA) (DANNI-OLIVEIRA, 2008).

Pela Portaria Normativa IBAMA nº 348, de 14/03/90 e a Resolução do CONAMA nº 03/90, foram estabelecidos os padrões nacionais brasileiros de qualidade do ar. A SEMA confirma os mesmos padrões através da Resolução SEMA nº 054/06. Para episódios agudos de poluição do ar são estabelecidos os níveis de atenção, alerta e emergência, conforme apresentado na TABELA 1.

TABELA 1 - CRITÉRIOS PARA EPISÓDIOS AGUDOS DE POLUIÇÃO DO AR (RESOLUÇÃO CONAMA N°03/90, SEMA N° 054/06)

Poluente	Tempo de amostragem	Nível de atenção ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Nível de alerta ($\mu\text{g m}^{-3}$)	Nível de emergência ($\mu\text{g m}^{-3}$)
PTS	24 horas	375	625	875
Fumaça	24 horas	250	420	500
PI	24 horas	250	420	500
SO₂	24 horas	800	1.600	2.100
CO	8 horas	17.000 ¹	34.000 ²	46.000 ³
O₃	1 hora	400	800	1.000
NO₂	1 hora	1.130	2.260	3.000

1, 2 e 3 Correspondem às concentrações volumétricas de 15, 30 e 40 ppm, respectivamente.

FONTE: IAP (2011)

3.3 FLORESTA URBANA

3.3.1 Os benefícios

As florestas são uma parte importante na vida natural e têm um papel fundamental na sustentabilidade das cidades. Há um crescente reconhecimento de que as florestas urbanas melhoram a qualidade de vida urbana em muitos aspectos, fornecendo benefícios para atender às necessidades locais (KÜCHELMEISTER, 2000).

As características das árvores proporcionam conforto para os habitantes das áreas urbanas, como sombra para veículos e pedestres, redução da poluição sonora, filtragem da poluição do ar, redução da amplitude térmica, abrigo para pássaros e

equilíbrio estético, amenizando efeitos de componentes antrópicos, como prédios, muros e vias públicas (BRACK, 2002; SILVA FILHO, 2002).

A presença de florestas em ambientes urbanos influencia o microclima local, produzindo conforto térmico aos cidadãos. A transpiração pelas folhas ameniza extremos de temperatura e controla a umidade relativa do ar. O sombreamento gerado pelas copas bloqueia a radiação solar e o calor, refrigerando o ar, além de filtrar os ventos (NOWAK *et al.*, 1998; KÜCHELMEISTER, 2000; BRACK, 2002). Árvores nos arredores de construções podem reduzir a demanda por aquecedores e ares condicionados, reduzindo, assim, as emissões associadas à produção de energia elétrica (MCPHERSON; SIMPSON, 1999).

Segundo Küchelmeister (2000), as florestas urbanas são ativos econômicos, quando são devidamente geridas; seus benefícios globais são considerados componentes vitais da infraestrutura urbana, essencial na manutenção de um meio ambiente saudável e sustentável. Como as árvores urbanas reduzem a necessidade de queima de combustíveis fósseis, elas são um investimento eficiente para a mitigação da poluição por gases de efeito estufa.

O plantio de árvores e sistemas agroflorestais em áreas urbanas pode proporcionar oportunidades de trabalho, que se configuram especialmente importantes nas cidades mais pobres. Nos países mais desenvolvidos, a indústria da arboricultura é um negócio significativo. As florestas urbanas e áreas verdes também oferecem oportunidades para muitos tipos de empresas formais e informais relacionados com a recreação (KÜCHELMEISTER, 2000).

Vailshery *et al.* (2013) estudaram o impacto das árvores em vias públicas na cidade de Bangalore, na Índia, para a mitigação dos efeitos de mudanças de microclima e aumento dos níveis de poluição. Os autores puderam concluir que as árvores urbanas têm impacto significativo no microclima das cidades, fornecendo maior conforto à população, pois as ruas sem arborização apresentaram temperatura, umidade e concentração de poluentes mais elevadas.

Além disso, as árvores e as florestas são um meio de conservar o solo das zonas urbanas, pois ajudam a evitar deslizamentos de terra em ecossistemas frágeis, como terrenos íngremes, com pouca vegetação em região com fortes chuvas sazonais, protegendo, assim, as moradias. Melhorar a qualidade do ar através das florestas certamente contribui para a saúde dos seres humanos, com benefícios

óbvios, tais como diminuição da incidência de doenças respiratórias (KÜCHELMEISTER, 2000).

As florestas urbanas são cada vez mais apreciadas para a educação ambiental. Uma série de cidades em diversos países desenvolvidos e em desenvolvimento têm jardins botânicos, zoológicos, trilhas e centros de informação de visitantes, onde as pessoas podem se informar sobre a flora e a fauna. Além disso, as florestas urbanas aumentam a recreação ao ar livre, oferecendo oportunidade de divertimento de baixo custo e acessível aos habitantes (KÜCHELMEISTER, 2000).

3.3.2 A arborização em áreas industriais

Há fortes evidências que os níveis ambientais de poluentes em algumas regiões industrializadas estão acima do limiar para danos fisiológicos nas árvores e alterações biogeoquímicas do solo. Reduções de emissões de enxofre em alguns países nos últimos 20 anos estão tendo efeitos positivos mensuráveis na qualidade do ar e, se continuarem, é esperado que reduzam esses estresses (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002).

À medida que o ambiente se torna mais propício para o crescimento das árvores, a cobertura arbórea geralmente aumenta. No entanto, quando o uso do solo é comercial ou industrial, essa variação não ocorre, pois a cobertura arbórea varia pouco entre locais mais ou menos florestados, o que indica que o uso do solo determina e limita o espaço disponível às árvores, independente do ambiente natural (NOWAK, 1996).

São poucos os dados referentes à vegetação em área industrial, o que torna esses locais os menos estudados no que concerne a estudos sobre floresta urbana. Em geral, zonas industriais são associadas à imagem agressiva ao ambiente, com muita fumaça, construções e barulho. Provavelmente, é isso que afasta o interesse para a silvicultura urbana em zonas industriais. Além disso, o espaço disponível para a vegetação em áreas industriais geralmente não é adequado ao crescimento das árvores. A predominância de locais asfaltados e com concreto aumenta o calor do verão, por elevar a temperatura do ar e do solo, que perde a umidade. O espaço limitado de solo exposto dificulta a infiltração da precipitação e a aeração dos solos, o

que diminui as características de um solo sadio para a vegetação. Além disso, há compactação do solo e danos às raízes, troncos e galhos pelo tráfego de caminhões e máquinas de grande porte. Os veículos também produzem emissões de poluentes, que se combinam com as emissões industriais, dificultando o crescimento e sobrevivência das árvores devido à má qualidade do ar (PORACSKY, 1999).

Entretanto, Poracsky (1999) demonstrou que árvores podem sobreviver e prosperar em áreas industriais, apesar de estarem submetidas às diversas condições negativas do local, que servem como barreira ao crescimento.

Como em outros ambientes de área urbana, as limitações ao crescimento podem ser superadas pela seleção adequada das espécies, cuidados no plantio e manutenção consciente. A implantação de árvores oferece uma rica oportunidade para a melhoria da qualidade das áreas industriais.

3.3.3 Dificuldades relacionadas à vegetação urbana

Áreas urbanas geram problemas ambientais sentidos em níveis locais e globais. Esses problemas vão desde o comprometimento da saúde humana e perdas de bem-estar econômico a danos ao ecossistema. A poluição do ar e da água e a geração de resíduos estão dentre os principais problemas. A conversão de florestas e terras agrícolas em desenvolvimento urbano podem também reduzir as áreas permeáveis, alterar os padrões de drenagem natural e causar graves inundações (KÜCHELMEISTER, 2000).

Entretanto, o plano de arborização nem sempre é incluído no planejamento dos municípios. Geralmente, a arborização das cidades não segue um planejamento adequado com conhecimentos técnicos, permitindo que o plantio de árvores seja feito por iniciativas particulares. Essa é uma situação que causa perda de eficácia da arborização, podendo gerar transtornos, ao invés de colaborar com o bem estar da população. Exemplos desses transtornos são o rompimento de fios de alta-tensão, interrupções no fornecimento de energia elétrica, entupimento em redes de esgoto, obstáculos para circulação e acidentes envolvendo pedestres, veículos ou edificações (SILVA FILHO, 2002). Os custos com manutenção e cuidado da vegetação urbana, especialmente com árvores, estão relacionados com os fatores que as cercam

(NOWAK, 1996), dificultando a administração da vegetação urbana por haver muitos fatores de diversas fontes a serem controlados, além do desenvolvimento do vegetal em si.

O reconhecimento e articulação das florestas urbanas pelos moradores é um componente vital para a paisagem urbana, infraestrutura e qualidade de vida. Municipalidades ao redor do mundo têm lançado diversos programas de florestas urbanas. Muitos progressos têm sido alcançados na pesquisa e desenvolvimento dos países industrializados. Entretanto, a silvicultura urbana em países em desenvolvimento está apenas em seu início. Ademais, o trabalho florestal é ausente nas iniciativas de cooperação para o desenvolvimento urbano, apesar do acelerado processo de urbanização que ocorre em países em desenvolvimento (KÜCHELMEISTER, 2000).

3.4 A FLORESTA E A POLUIÇÃO DO AR

Com o constante aumento dos impactos produzidos pelos seres humanos no meio ambiente, a poluição do ar é assunto de preocupação crescente, principalmente nas zonas urbanas (SOUZA, 2006; VAILSHERY *et al.*, 2013).

As altas concentrações de poluentes atmosféricos são prejudiciais à saúde humana, da fauna e da flora, podendo causar efeitos mutagênicos em células dos seres vivos e aumentar taxas de morbidade e mortalidade, sendo de particular importância os compostos fotoquímicos e materiais particulados (KLUMPP *et al.*, 2001; SOUZA, 2006).

No ecossistema florestal, os poluentes do ar influenciam de diversas maneiras e níveis de organização biológica, sendo todos os cultivos vegetais afetados adversamente (MUDD; KOZLOWSKI, 1975; MCLAUGHLIN, 1985). Geraldo *et al.* (2014) assinalam a dificuldade encontrada na administração do impacto por poluentes nas plantas devido à ausência de legislações nacionais ou internacionais que estabeleçam valores limites para concentrações tóxicas de substâncias nas plantas.

Os ecossistemas florestais são componentes muito importantes da biosfera. Com o aumento do impacto antropogênico e da poluição ambiental o papel desses ecossistemas é especialmente significativo. Considerando por um lado o valor

ambiental e econômico das florestas, e sua sensibilidade ao ambiente e à poluição por outro lado, os ecossistemas florestais podem ser considerados ferramentas adequadas para o monitoramento e avaliação ambiental, capazes de caracterizar tendências gerais do estado de toda a biosfera impactada por atividades antrópicas (JUKNYS *et al.*, 2002).

3.5 EFEITOS DOS POLUENTES AÉREOS NAS PLANTAS

McLaughlin (1985) aponta um déficit de pesquisas sobre os efeitos da poluição atmosférica na floresta em sua condição natural, uma vez que a maioria dos trabalhos ocorre em condição controlada no interior de laboratórios. Segundo o autor, a maioria das pesquisas tem foco em poluentes gasosos e presença de metais nos tecidos vegetais.

São diversos os efeitos causados por poluentes aéreos nas plantas. Alguns poluentes em concentrações variáveis podem causar estresse cumulativo, outros podem ser metabolizados internamente e ficar estacionários por longos períodos, outros poluentes agem transitoriamente, ajustando-se às novas concentrações de equilíbrio nas plantas e no solo quando há mudança nos níveis externos de poluição e alguns poluentes nem chegam a ser absorvidos pelos tecidos vegetais. A poluição pode induzir a susceptibilidade das plantas a estresses bióticos e abióticos, e os tipos de interações que ocorrem dependem das reações físicas e químicas entre os poluentes, o solo e a cobertura vegetal da floresta. Podem ocorrer relações de adição, antagônicas ou sinérgicas entre poluentes e floresta, de acordo com o tipo de poluente envolvido, sua concentração e condição de exposição da floresta ao poluente (MURPHY, 1977; MCLAUGHLIN, 1985).

As variáveis ambientais, como a temperatura, a umidade e os níveis de radiação, assim como variáveis internas das plantas, como espécie, fase de crescimento e estado nutricional, têm mostrado forte influência na resposta das plantas às doses de poluição (MCLAUGHLIN, 1985). A sensibilidade da floresta a fatores bióticos e abióticos é afetada significativamente pelas mudanças climáticas, sendo as causas mais aparentes os efeitos do aumento de dióxido de carbono (CO₂) e temperatura na produção fotossintética, os efeitos da temperatura na frequência e

severidade do déficit hídrico e os efeitos do aumento de absorção e alocação de nitrogênio no caule (MCLAUGHLIN; PERCY, 1999).

Relações alteradas entre água e plantas podem resultar em redução da capacidade da planta de captar água do solo ou em deficiência da capacidade de controlar a perda de água pela folhagem (MCLAUGHLIN, 1985). A relação com a poluição do ar pode aumentar o estresse hídrico em árvores por dois principais fatores: alteração da transpiração em nível estomatal durante o controle do fluxo de água pelas folhas ou por efeitos relacionados às mudanças na biomassa ou na função das raízes para absorção de água (MCLAUGHLIN; PERCY, 1999).

Os metais pesados, provenientes da poluição e depositados pela atmosfera ou movidos pelo solo, são de especial preocupação no ecossistema florestal, pois podem se acumular no solo ou no tecido das plantas, permanecendo por longos períodos e sendo tóxicos a algumas espécies (MCLAUGHLIN, 1985).

Apesar da importância dos estudos sobre a influência dos poluentes do ar sob a vegetação arbórea, ainda são escassos os trabalhos desenvolvidos no mundo, onde muitas cidades se expandiram ao redor de fontes poluidoras, como por exemplo Gothenburg na Suécia (MEDING, 1989), Syracuse nos Estados Unidos (SHORT *et al.*, 1993), Kanpur na Índia (TRIPATHI *et al.*, 2005) e é o caso de Araucária no Brasil (NEGRELLI, 2004; SILVA, 2006; TADANO, 2007).

3.6 MITIGAÇÃO DA POLUIÇÃO PELA FLORESTA

Programas que visem aumentar a cobertura arbórea de zonas urbanas são medidas de conservação da qualidade do ar que devem ser tomadas pelos gestores ambientais. Embora apenas uma parte da poluição seja removida por árvores, o efeito dessa remoção sobre a poluição total pode produzir impactos suficientemente importantes para justificar a gestão da cobertura florestal como um meio para melhorar a qualidade do ar e a qualidade de vida da população (NOWAK *et al.*, 2006).

As árvores fazem a mitigação da poluição do ar através das trocas gasosas decorrentes de suas atividades fisiológicas, participando da absorção e filtragem dos contaminantes do ar (MURPHY, 1977; LIMA, 1980). Elas também são uma barreira à poluição sonora, atenuando os efeitos através da reflexão e absorção da energia

sonora nas camadas viscosas e termais da superfície dos tecidos vegetais ou pelo amortecimento da oscilação sonora por galhos e/ou caules (AYLOR, 1977).

As áreas florestais podem remover quantidades significativas de poluentes do ar, proporcionando melhorias na qualidade ambiental e da saúde humana. A absorção de gases poluentes pelas árvores é feita principalmente pelos estômatos presentes nas superfícies foliares, que captam moléculas dos gases que reagem com outras moléculas presentes no interior da planta. Além da absorção de alguns gases, algumas partículas sólidas em suspensão podem ser interceptadas pela superfície arbórea e ali ficam retidas (NOWAK *et al.*, 2006). A vegetação em locais urbanos pode também filtrar a poluição aérea mediante captura ou aprisionamento de partículas de poluentes gasosos, como O₃ e CO₂, pela superfície foliar (BRACK, 2002).

Portanto, espécies arbóreas podem ser utilizadas como cinturões florestais para a limpeza no entorno de áreas urbanas e industriais. A efetividade desses cinturões vegetais depende das características da interação da espécie com o poluente, como adaptação da árvore às condições ambientais e do sítio e níveis de absorção dos poluentes (MURPHY, 1977).

Os valores de remoção da poluição pela floresta variam entre locais com base na extensão da cobertura arbórea, concentração de poluição, características fisiológicas das espécies arbóreas (principalmente quanto à absorção foliar) e características meteorológicas (NOWAK *et al.*, 2006). Segundo os autores, todos esses fatores se combinam para determinar a taxa de remoção da poluição pela cobertura arbórea.

Há alterações nas taxas de fotossíntese e respiração quando as folhas são expostas a poluentes ambientais e essas taxas são variáveis, de acordo com a espécie ou seu genótipo. Como a poluição do ar é um problema sério em diversas áreas, há necessidade de se conhecer mais sobre a base fisiológica de algumas espécies e genótipos que são mais injuriados pela poluição do que outros (KOZLOWSKI; PALLARDY, 1997).

Níveis crescentes de CO₂ e de outros gases de efeito estufa têm sido considerados contribuintes para o aumento das temperaturas globais, por acumularem ondas de calor na atmosfera. Esse aumento de CO₂, principal gás do efeito estufa, é altamente atribuído aos combustíveis fósseis e ao desmatamento (NOWAK, 1993).

As árvores em seu crescimento dissipam o carbono atmosférico, pois utilizam energia da fotossíntese para acumular material lenhoso em seu crescimento, produzindo taxas de retirada de CO₂ maiores que a liberação pela a respiração. A extração e armazenamento de carbono são diretamente proporcionais à quantidade de tamanho do tecido vegetal, e quanto maior a árvore, mais benefícios secundários ela irá fornecer, como sombreamento e evapotranspiração. Quando as árvores morrem, o carbono presente em seus tecidos retorna à atmosfera através da decomposição, tornando necessária sua reposição para compensar a fonte de carbono reintroduzida na natureza, para que o ciclo do carbono seja sustentável (NOWAK, 1993; MCPHERSON; SIMPSON, 1999; BRACK, 2002).

Os projetos de sequestro de carbono em zonas urbanas devem ser planejados em longo prazo, pois é necessário considerar o ciclo de vida completo das árvores e seus processos fisiológicos, para se obter uma aproximação sistemática e consistente da cadeia de redução e absorção do CO₂ (MCPHERSON; SIMPSON, 1999; BRACK, 2002).

Em cidades brasileiras com característica de polo industrial, a vegetação arbórea está submetida à condição de grande poluição atmosférica, sendo importante compreender a dinâmica de crescimento nesses ambientes adversos para se estabelecer critérios adequados de controle.

3.7 CRESCIMENTO ARBÓREO E MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO POR DENDROCRONOLOGIA

Os poluentes podem influenciar no crescimento e desenvolvimento da floresta através de múltiplas vias e mecanismos e em escalas de tempo altamente variáveis. Os efeitos podem ser diretamente prejudiciais, no contato superficial com as plantas, resultando na limitação da capacidade fisiológica das raízes, ou também indiretamente, como consequência da disponibilidade de nutrientes ou de metais tóxicos (MCLAUGHLIN, 1985).

Mudanças fisiológicas pela poluição do ar podem ser verificadas por vários padrões de efeitos nas fontes de carbono, água e nutrientes requeridos para a saúde da floresta. Esses recursos reduzidos para as florestas expostas à poluição causam

principalmente o decréscimo da produção de carboidratos pelas árvores afetadas. Essas mudanças conduzem a um deslocamento na alocação relativa de energia para o crescimento a custos de redução da resistência a estresses bióticos e abióticos (MCLAUGHLIN; PERCY, 1999).

Essas interações também indicam aproximações ao entendimento da extensão, natureza e implicações desses efeitos no crescimento das florestas. A poluição do ar reflete diretamente na floresta, alterando os processos fisiológicos das árvores, gerando efeitos na produção ou na alocação de carboidratos utilizados para o crescimento. Ocorrem respostas alternadas que podem derivar primeiramente da capacidade nutricional, através da modificação da função da raiz ou pela alteração dos ciclos biogeoquímicos do solo. Ambos os fatores são capazes de alterar a influência do estresse climático nos padrões de crescimento, sendo importante sua compreensão para o entendimento da extensão, natureza e implicações desses efeitos no crescimento da floresta (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002).

É importante, quando comparado o crescimento antes e depois de algum fator externo de influência ou estresse, considerar que os padrões de crescimento mudam durante a vida da planta. Por exemplo, taxas fotossintéticas e quantidade de produtos fotossintetizados utilizados na formação dos tecidos da madeira em coníferas variam com a idade da planta, época do ano e fatores ambientais (LEGGE, 1977). Essas mudanças de redução/retenção de área foliar pelo estresse por poluição do ar podem afetar o crescimento de múltiplas estações, devido à redução das reservas de carboidratos e resultado da resiliência fisiológica reduzida (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002).

A falta de provas científicas da relação de causa e efeito entre poluentes atmosféricos e quedas extensivas de florestas deve ser considerada a partir de duas hipóteses possíveis (MCLAUGHLIN; BRÄKER, 1985): a) Os declínios florestais podem ser de origem natural e não relacionados com o estresse por poluição; b) Ainda não foram caracterizadas e quantificadas as mudanças em um ponto em que os efeitos da poluição podem ser separados dos inumeráveis estresses e modificadores que normalmente controlam o crescimento e desenvolvimento da floresta. Em qualquer dos casos, os autores esclarecem que uma escala ampla, imaginativa e multidisciplinar de pesquisas é necessária para quantificar as mudanças e identificar os mecanismos de resposta.

O crescimento e a produtividade das árvores, como principal componente dos ecossistemas florestais, é um dos melhores indicadores para refletir o estado geral e a sustentabilidade de uma área florestal (JUKNYS *et al.*, 2002).

Pesquisas baseadas em danos visuais às espécies arbóreas são importantes para dar base aos estudos da dinâmica de crescimento dessas espécies, mas não são suficientes para identificar o momento em que ocorreram mudanças que antecederam o sintoma visual observado e as causas dessas mudanças (MCLAUGHLIN; BRÄKER, 1985). Dados em longo prazo são essenciais para estudar a influência de fatores adversos ao crescimento e causadores de mortalidade da floresta, pois esses processos provocam efeitos cumulativos nas árvores e no solo (MUSIKA *et al.*, 2004).

A estrutura anatômica das árvores possibilita a avaliação do histórico da taxa de crescimento durante um período, com base na análise retrospectiva dos anéis de crescimento (JUKNYS *et al.*, 2002). A dendrocronologia é uma técnica que permite a obtenção de dados de series longas e de alta resolução do crescimento individual e do povoamento de árvores (FRITTS, 1976), que garante confiabilidade dos resultados, além de exigir pouco tempo para a coleta de amostras (MUSIKA *et al.*, 2004; STEPKA, 2012).

As árvores crescem regularmente por centenas de anos influenciadas por fatores ambientais locais, registrando padrões e condições em seus anéis de crescimento. Por isso, a análise desses anéis permite documentar temporalmente informações referentes a padrões ambientais sendo uma ótima ferramenta para o estudo da poluição do ar (ASHBY; FRITTS, 1972; GARBE-SCHÖNBERG *et al.*, 1997; SEFTIGEN *et al.*, 2013).

A evolução da dendrocronologia como ferramenta de pesquisa nos últimos anos tem sido considerada em função dos avanços na mensuração e tecnologia de análise e no entendimento dos mecanismos de poluição na floresta. Essa evolução representou uma resposta à necessidade de informações sobre o passado e o futuro das florestas com as mudanças climáticas (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002).

Determinar a extensão da redução de florestas, que é induzida por agentes causais específicos, requer estudos de campo e laboratório, que considerem amplas variedades de modificadores bióticos e abióticos. A influência de deposições úmidas e secas, chuva e névoa, poluentes gasosos e chuva ácida, acidez e outros aspectos da química de chuvas, efeitos diretos e indiretos na natureza, e repostas primárias e

secundárias nas árvores são questões importantes a serem consideradas nesses estudos (MCLAUGHLIN; BRÄKER, 1985).

Essas interações têm cada vez mais atenção em pesquisas sobre os mecanismos de respostas das florestas às contínuas mudanças climáticas. A dendroclimatologia não é uma ciência independente, pois é mais funcional quando combinada a estudos mecanísticos que ajudam a definir estratégias de amostragem apropriada e sequências analíticas baseadas em estudos biológicos (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002).

Os métodos estatísticos e matemáticos facilitam a caracterização dos padrões da variável de interesse nos anéis de crescimento, além de sinais e ruídos. O que constitui sinais e ruídos nos anéis de crescimento depende dos fatores que influenciam no crescimento. Os sinais de interesse para estudos da poluição do ar têm semelhanças e diferenças da análise dendroclimática. Os estresses primários causados pelos poluentes devem induzir mudanças fisiológicas similares ou interativas com o estresse induzido pelo clima e, como no estresse climático, eles devem variar anualmente ou em menores escalas de tempo. Por isso, a dendroclimatologia deve ser ferramenta auxiliar e estar à frente dos estudos sobre o futuro das florestas e das árvores isoladas com as mudanças ambientais e poluição crescentes (MCLAUGHLIN *et al.*, 2002).

McLaughlin e Bräker (1985) listaram 3 níveis de aproximação que podem ajudar nas análises dendroecológicas dos efeitos da poluição do ar em árvores: a) definição dos padrões temporais e espaciais das mudanças para identificação das variáveis que interferiram no crescimento, através de datação dos sinais que causaram nos anéis de crescimento das árvores; b) análises estatísticas para definir relações entre composição da madeira ou crescimento com concentração de poluentes. Essas análises permitem o entendimento das potenciais causas de alteração no crescimento; c) estudos sobre os mecanismos fisiológicos que são alterados pela poluição do ar e influenciam diretamente no crescimento arbóreo.

A indicação do efeito no crescimento das árvores influenciado por metais pode ser obtida por análises de correlação e de diferenciação. As concentrações excessivamente altas ou baixas de elementos químicos podem causar um declínio na sensibilidade das árvores para responder a mudanças ambientais. Altas concentrações podem causar estresse ao crescimento da árvore (XU *et al.*, 2014).

Baes III e McLaughlin (1984) sugerem que análises multielementares dos anéis de crescimento podem ser úteis para determinar quando as mudanças na poluição do ar e chuva ácida começaram a ocorrer e qual sua extensão geográfica, para prover evidências-chaves das fontes de poluição.

Estudos sobre a influência da poluição aérea no tronco de espécies lenhosas vêm sendo feitos há alguns anos. Clewenger (1913) registrou imagens de troncos de *Ulmus americana* L. afetados pela fumaça e por gases de trens nos Estados Unidos. Polge (1970) notou redução da largura dos anéis de crescimento e até ausência de anéis em anos mais críticos em um povoamento de *Picea abies* (L.) H. Karst., sujeito à emissão de fumaça pelas indústrias durante a Segunda Guerra Mundial.

Ashby e Fritts (1972), em estudo dendroclimatológico de *Quercus alba* Deam nos Estados Unidos, registraram menores taxas de crescimento para a espécie, que foram associadas à poluição. Segundo os autores, mesmo a grandes distâncias de fontes poluidoras o crescimento das árvores é prejudicado, pois substâncias tóxicas inibem a capacidade fotossintética e processos metabólicos. Tal efeito pode ser acumulado ao longo dos anos e causar declínio gradual, porém marcado na largura dos anéis de crescimento, enquanto as mudanças anuais de temperatura produzem variações mais sutis. Os autores também correlacionaram a poluição do ar com aumento dos índices de neblina, que também podem ter influenciado na redução do crescimento das árvores devido à menor disponibilidade de luz para a realização da fotossíntese.

McLaughlin *et al.* (1982) compararam crescimento anual com a capacidade e alocação fotossintética para determinar a taxa e a causa do declínio de vigor de *Pinus strobus* L. com estresse oxidativo nos Estados Unidos, causado pela exposição ao O₃. A análise dos anéis de crescimento revelou um padrão comum para as árvores intermediárias e tolerantes, enquanto as árvores sensíveis (definidas pela coloração das acículas) mostraram um grande declínio do crescimento, de 70% nos últimos 15 anos, e perda na capacidade de leitura dos anéis de crescimento. Os produtos fotossintéticos e capacidade de fotossíntese nos ramos e raízes foram reduzidos. Esses resultados, segundo os autores, sugerem que o declínio no vigor das árvores, induzido pela poluição do ar, resultou em reduções na longevidade e tamanho das acículas, aumento da atividade respiratória e alteração dos padrões de translocação das árvores. As árvores sensíveis não mostraram resiliência no crescimento como as

outras árvores, aparentando maior susceptibilidade aos declínios por pressões adicionais de origem biótica ou abiótica.

Hättenschwiler *et al.* (1997) estudaram os efeitos em longo prazo no crescimento de árvores expostas a elevadas concentrações de CO₂ comparadas às árvores que se desenvolveram em ambiente de concentração controlada desse gás. Foram observados caules de árvores até 12% maiores nas áreas expostas a altas concentrações do gás, porém essa estimulação ao crescimento ocorreu principalmente na fase jovem. Quanto mais se aproximavam da fase senil, menos influenciadas eram pela disponibilidade de CO₂. Os autores inferiram que na fase de regeneração, povoamentos florestais podem ser acelerados em crescimento com o enriquecimento do ar atmosférico com CO₂.

McLaughlin e Percy (1999) estudaram quatro regiões de florestas nos Estados Unidos e encontraram efeitos similares de poluentes do ar no crescimento das árvores nos distintos locais. A produção fotossintética reduzida em resposta ao estresse por poluição crônica foi encontrada nos quatro sistemas examinados. Isso ocorreu como resultado das mudanças nas taxas fotossintéticas por unidade de massa foliar e também devido à mudança na quantia de área foliar produzida ou retida sob estresse de poluição crônica. Entretanto, os mecanismos de efeito e as classes de idade das folhagens envolvidas foram diferentes para cada floresta.

Musika *et al.* (2004) encontraram correlação negativa no crescimento de árvores com SO₂ e NO₂ entre os anos de 1989 e 1999 para *Picea abies* (L.) Karst. e *Fagus sylvatica* L. A média de O₃ não foi relacionada ao crescimento, mas a máxima dos valores reportados nos sítios para o componente foi negativamente correlacionada ao crescimento. Uma variável representando os efeitos combinados de O₃, NO₂ e SO₂ foi negativamente correlacionada ao crescimento de ambas as espécies e os dados de poluição foram utilizados para classificar locais de alta e baixa poluição. A diferença cronológica baseada nessas categorias indicou os padrões de declínio nos sítios de alta poluição relativos aos sítios de baixa poluição. A área basal nos sítios de maior poluição decresceu aproximadamente 50% para *F. sylvatica* e 20% para *P. abies* nos últimos 45 anos.

Seftigen *et al.* (2013) registraram na Suécia impacto negativo da fertilização do solo com nitrogênio e outros compostos acidificantes no crescimento de *Pinus sylvestris* L. e nenhuma mudança em *Picea abies*, do que concluíram que *P. abies* é menos suscetível à acidificação em ecossistema florestal do que *P. sylvestris*.

Além da redução do incremento anual, análises da composição dos anéis de crescimento registram interferência da poluição na estrutura do caule das árvores. Anéis anuais de árvores em áreas urbanas nos Estados Unidos refletiram excesso de CO₂ livre proveniente de combustíveis fósseis (CAIN, 1978). O autor alertou para o risco de associação entre o CO₂ e outros contaminantes, ainda que a concentração do CO₂ não seja considerada tóxica.

No Parque Nacional Great Smoky Montains, no oeste de Tennessee, Baes, McLaughlin e Bräker (1985) registraram camadas anuais de crescimento em árvores de *Pinus echinata* Mill. suprimidas e aumento no conteúdo de ferro entre os anos de 1863 e 1912, um período de atividades de fundição e de altos lançamentos de SO₂ na região.

Xu *et al.* (2014) utilizaram anéis de crescimento de espécies nativas de folhosas no Leste da China para recuperar o histórico dos eventos de poluição por chumbo e zinco em uma região de exploração de minérios. Os autores encontraram diferentes concentrações dos componentes nos anéis de crescimento que coincidiram com as datas de abertura das minas e com a transição da exploração sobre o solo para a exploração subterrânea, porém essas concentrações não afetaram o crescimento das árvores, mostrando que as árvores podem fornecer dados contínuos de monitoramento da poluição por metais pesados no futuro.

No Brasil, já foram realizadas pesquisas do uso de anéis de crescimento de espécies arbóreas como ferramenta para o monitoramento ambiental. Chagas (2013) estudou os anéis de crescimento de duas espécies de folhosas em área urbana e industrial em Paulínia, SP e constatou que as espécies responderam sensivelmente à poluição do ambiente e que possuem grande potencial para o monitoramento ambiental. Geraldo *et al.* (2014) registraram a viabilidade do uso de anéis de crescimento como biomonitores do ambiente. O estudo dos anéis de crescimento da espécie *Tipuana tipu* (Benth.) Kuntze no município de São Paulo demonstrou teores elevados e crescentes de cromo, níquel e chumbo nos últimos anos indicando um aumento da poluição ambiental nas regiões estudadas.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

Foi escolhido o município de Araucária para a execução do presente estudo por ser um grande polo industrial do sul do Brasil e que conta com uma rede de monitoramento da qualidade do ar administrada pelo governo do Estado do Paraná em parceria com o Instituto LACTEC (Institutos de Tecnologia para o Desenvolvimento) e com indústrias locais.

O município de Araucária está localizado na região metropolitana de Curitiba, no estado do Paraná (49° 23' 52" S e 25° 35' 06" W). O clima da região é subtropical quente-temperado, sempre úmido, variando de verões frescos a invernos frios com ocorrência de geadas. A temperatura média anual é de 16 °C e a maior precipitação ocorre no mês de janeiro e a menor no mês de agosto. A umidade relativa do ar atinge em torno de 80% durante o ano todo (PARANÁ, 2015).

O município apresenta os segmentos rural e urbano. O segmento rural tem uma área de aproximadamente 400 km² e conta com 8% da população total do município e o urbano, composto por 18 bairros, possui 84 km² com 92% dos habitantes contabilizados (IBGE, 2010). Para o presente trabalho, foi apenas considerado o perímetro urbano do município, ilustrado na FIGURA 1.

As indústrias detêm o maior peso na economia municipal desde os incentivos da década de 1970, sendo por isso o município um dos maiores arrecadadores de impostos do Estado do Paraná (NEGRELLI, 2004).

O processo de urbanização do município foi marcado pela década de 1970, época em que o Plano Nacional de Desenvolvimento (PND) incentivou a criação de diversas indústrias no país. A proximidade do município ao bairro Cidade Industrial de Curitiba (CIC) o tornou interessante para a instalação de indústrias de abastecimento para tal região e a criação do Centro Industrial de Araucária (CIAR) em 1973. Como estratégia para o PND, foi instalada em 1972 a Refinaria de Petróleo Presidente Getúlio Vargas (REPAR), de propriedade da Petróleo Brasileiro S.A. (Petrobrás) (NEGRELLI, 2004; SILVA, 2006; TADANO, 2007).

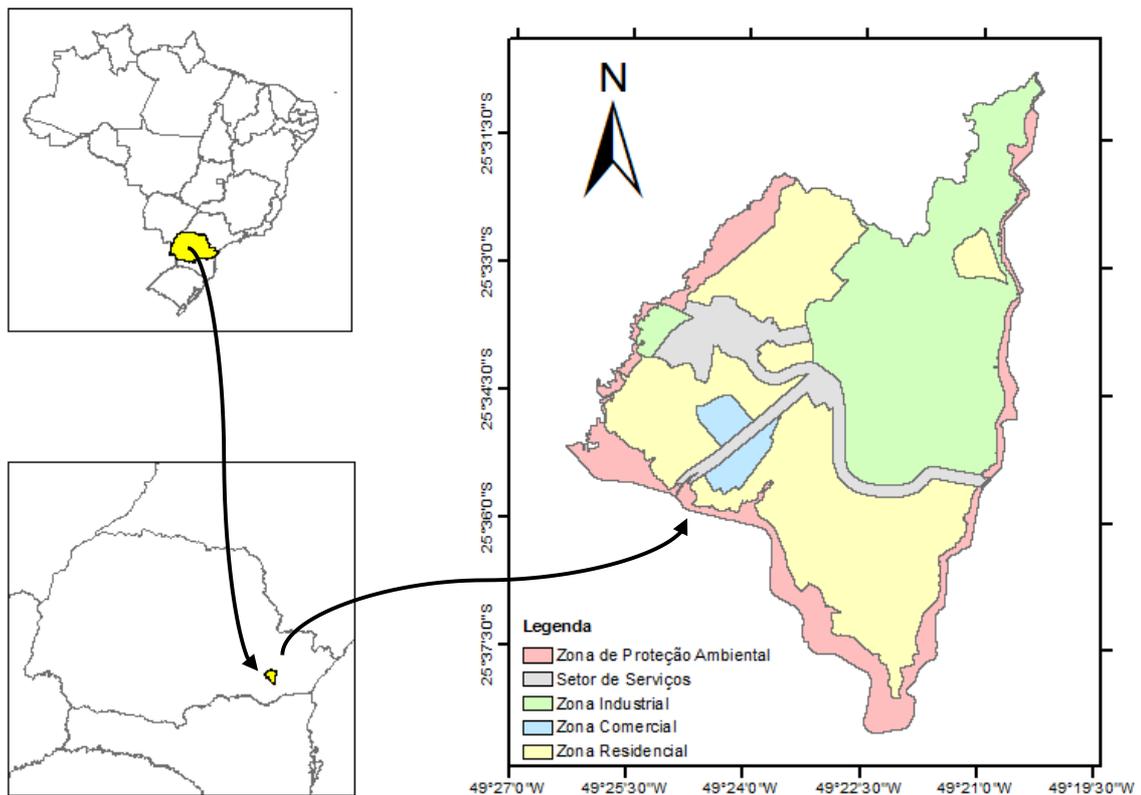


FIGURA 1 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR, E ZONEAMENTO URBANO
 FONTE: Paraná (2010)

Na década de 1990, o governo do Paraná forneceu incentivos para indústrias do setor automobilístico no Estado. Com isso, instalou-se a Companhia Siderúrgica Nacional (CISA/CSN), um grande empreendimento industrial que surge de um consórcio entre a CSN e a empresa IMSA Aceros S.A. do México, no final da década de 1990. Também houve a construção da termoeletrica UEG - Unidade de Araucária, um grande empreendimento que recebeu apoio do governo estadual, mas que, devido a problemas técnicos, não é ativa, pois não pôde operar com o gás natural vindo da Bolívia pelo GASBOL (NEGRELLI, 2004; SOUZA, 2006). A urbanização devido à industrialização foi muito intensa, enquanto o crescimento populacional do Brasil foi de 21% na década de 1980 a 1990, o do município de Araucária foi de 70% no mesmo período (TADANO, 2007).

O processo de industrialização gera benefícios econômicos para o município, porém acarreta consequências ambientais devido à poluição do ar e da água (NEGRELLI, 2004). Tadano (2007) registrou nos anos de 2004 e 2005 duas vezes

mais pessoas com problemas respiratórios no município de Araucária do que em Curitiba, ainda que a população da capital seja 15 vezes maior que a do município industrial.

O município possui 7 estações de monitoramento do ar que registram diariamente níveis de concentração de poluentes e variáveis meteorológicas. Segundo Souza (2006), essa rede de monitoramento é resultado de pressões para controle da poluição atmosférica exercidas pela mídia e pela atuação da ONG AMAR (Associação de moradores de Araucária). No trabalho da autora, foi concluído que a população urbana convive com níveis de poluentes atmosféricos prejudiciais e cumulativos à saúde e ao bem-estar, e que a medida de monitoramento é a principal iniciativa tomada pelo CIAR com objetivo de redução dos prejuízos causados pela poluição industrial.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA FLORESTAL DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR

4.2.1 Imagens

Foram utilizadas imagens de alta resolução espacial (5 m) de 2005 e de 2012. As imagens SPOT referentes ao ano de 2005 foram cedidas pela Secretaria Estadual de Desenvolvimento Urbano (SEDU/PR). As imagens RapidEye de 2012 foram adquiridas junto ao Acervo do Geocatálogo do Ministério do Meio Ambiente. Ambas imagens foram recebidas ortorretificadas. As características das imagens adquiridas se encontram na TABELA 2.

TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS DAS IMAGENS UTILIZADAS NO PRESENTE TRABALHO

Satélite	Ano	Tamanho do pixel	Bandas espectrais	Resolução espectral (μm)	N
SPOT 5	2005	5 metros	Verde	0,50 - 0,59	B1
			Vermelho	0,61 - 0,68	B2
			Infravermelho próximo	0,78 - 0,89	B3
RapidEye	2012	5 metros	Azul	0,44 - 0,51	B1
			Verde	0,52 - 0,59	B2
			Vermelho	0,63 - 0,68	B3
			Red edge	0,69 - 0,73	B4
			Infravermelho próximo	0,76 - 0,85	B5

FONTE: EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE (2013)

A resolução espectral das imagens RapidEye permite a descrição das propriedades espectrais dos objetos mais precisamente do que outras imagens. Como o sensor do satélite RapidEye foi desenvolvido para atender aos mercados florestal e agrícola, incorpora em seu espectro a banda “red edge”. Essa banda é a mais indicada para representar a vegetação, por absorver comprimentos de onda de 700 nm, que é o limite de reflectância emitido pela clorofila (HORLER *et al.*, 1983). Sua inclusão beneficia a classificação das imagens, especialmente em relação às superfícies vegetadas e urbanas (SHUSTER *et al.*, 2012). Portanto, a resolução espacial é adequada para a representação das florestas urbanas (RECIO *et al.*, 2011), conforme proposto no presente trabalho.

4.2.2 Classificação das imagens

A classificação supervisionada das imagens SPOT e RapidEye foi realizada com o software ArcGis 10.1, pelo método supervisionado denominado classificação de máxima verossimilhança.

De acordo com os objetivos deste trabalho, pela interpretação das imagens, foram identificadas no município 2 classes de uso do solo (TABELA 3).

TABELA 3 - CLASSES DE USO DE SOLO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR, E DESCRIÇÃO DE SEUS ATRIBUTOS PREDOMINANTES

Classes de uso do solo	Descrição da área
Remanescentes florestais	Áreas cobertas predominantemente por copas de árvores, caracterizando as áreas florestais.
Outros usos do solo	Predominância de campos de uso agrícola ou coberto por gramíneas, solo exposto, telhados de construções residenciais, comerciais e industriais e superfícies pavimentadas/asfaltadas e corpos d'água.

FONTE: A autora (2015)

Inicialmente, foram selecionadas amostras de treinamento conforme exemplificado na FIGURA 2, totalizando cerca de 30 mil pixels para cada classe de uso do solo. Amostras de treinamento são conjuntos de pixels que representam padrões reconhecidos discerníveis ou classes potenciais. O sistema calcula estatísticas a partir das amostras que o orientam para a classificação da imagem por algoritmos de máxima verossimilhança entre pixels (NAGI, 2014).

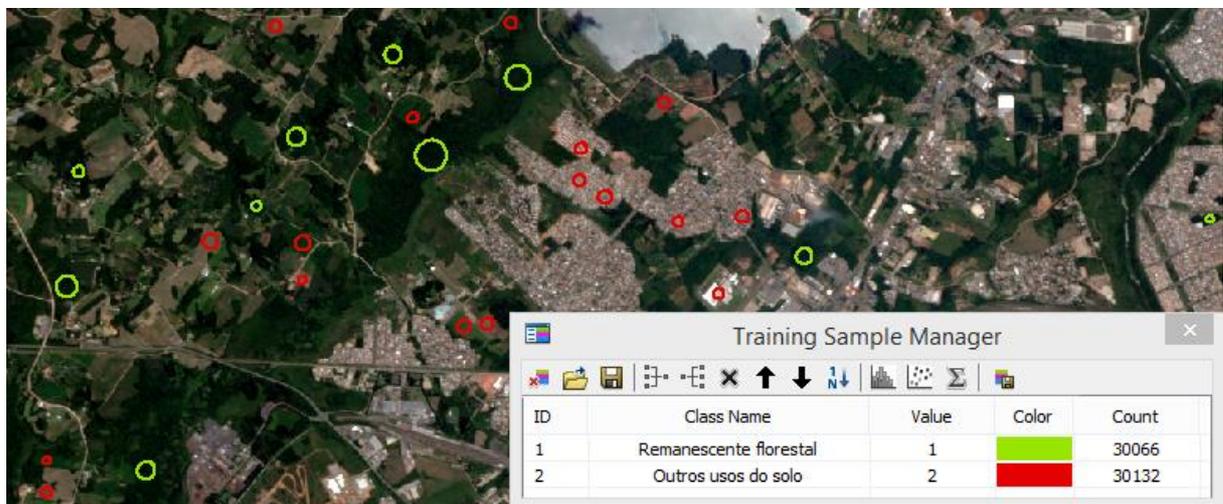


FIGURA 2 - EXEMPLIFICAÇÃO DA COLETA DE AMOSTRAS DE TREINAMENTO PARA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DO USO DO SOLO DE ARAUCÁRIA, PR

FONTE: A autora (2015)

4.2.3 Teste de acurácia da classificação

A acurácia da classificação das imagens foi determinada pelo uso de matrizes de confusão, que são utilizadas para expressar o número de pixels classificados corretamente de acordo com o teste de acurácia realizado pelo autor do mapa. As matrizes de confusão mostram claramente os erros de classificação em cada classe resultante da mistura e falta de informação das imagens, e também informam outros índices utilizados usualmente para avaliar a acurácia, como a exatidão global, os erros do produtor e do usuário e o coeficiente de Kappa (ZHOU; XIONG, 2012). Foram amostrados aleatoriamente polígonos que somaram 30 mil pixels de referência em cada classe de uso do solo, distribuídos ao longo das imagens originais, exemplificados em círculos brancos na FIGURA 3. As atribuições de classe desses pixels foram sobrepostas às classes identificadas pelo software, para a avaliação da acurácia do método de classificação, através da quantificação de pixels classificados corretamente.



FIGURA 3 - EXEMPLIFICAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS DE REFERÊNCIA PARA TESTES DE ACURÁCIA DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA
FONTE: A autora (2015)

4.2.4 Quantificação das áreas classificadas

Pela transformação das imagens classificadas em vetores, foi possível calcular as áreas dos polígonos que compõem a classe de remanescentes florestais do município. Pela diferença das áreas da imagem de 2012 e de 2005, foi também possível quantificar as áreas de ganhos e perdas de floresta no período estudado. As áreas quantificadas para o perímetro urbano foram também divididas de acordo com o zoneamento urbano do município (FIGURA 1).

4.3 ANÁLISE TEMPORAL DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Foram utilizados dados horários de 4 estações automáticas de monitoramento da qualidade do ar (FIGURA 4) do município de Araucária, PR, referente ao período de 2003 a 2013. Os dados foram fornecidos pelo IAP para a comparação de concentrações de poluentes e variações meteorológicas no município. Estão listados na TABELA 4 os componentes registrados em cada estação automática de monitoramento no perímetro urbano do município. Além das concentrações dos poluentes atmosféricos, foram analisados dados horários de temperatura e umidade relativa do ar em cada uma das estações de monitoramento.

TABELA 4 - DESCRIÇÃO DAS QUATRO ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO AMBIENTAL NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR

Estação	Localização/Categoria	Parâmetros químicos medidos	Início	Responsável
Assis (ASS)	Norte/Bairro Fazenda Velha/Industrial	SO ₂ , O ₃ , NO, NO ₂ e PTS	Abril de 2000	SMMA Araucária
NIS (UEG)	Central /Bairro Centro/Industrial e Urbano	SO ₂ , O ₃ , NO, NO ₂ e PI	Maio de 2003	IAP
CSN (CSN)	Nordeste/Bairro Sabiá/Industrial	SO ₂ , O ₃ , NO, NO ₂ , CO, PTS e PI	Agosto de 2002	CSN
REPAR (RPR)	Nordeste de Araucária/Bairro Sabiá/Industrial	SO ₂ , O ₃ , NO, NO ₂ , CO, PTS e PI	Julho de 2003	Petrobrás – UN-REPAR

FONTE: IAP (2011)

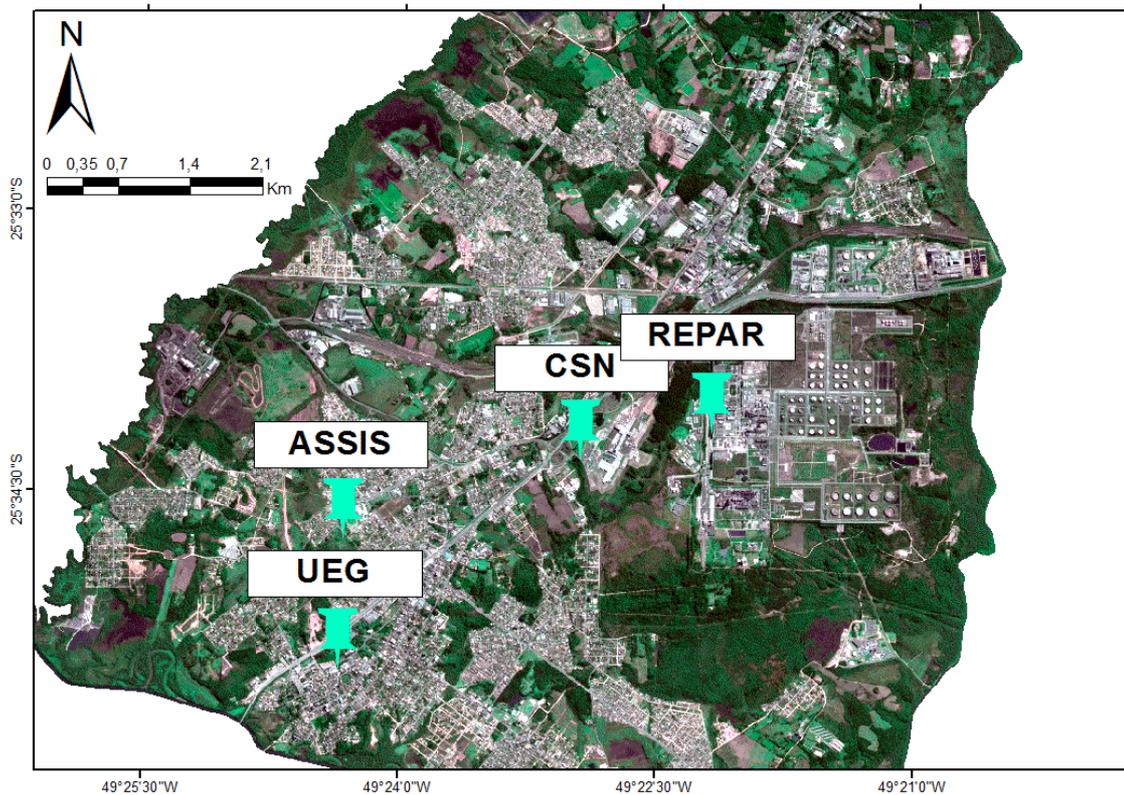


FIGURA 4 - ESTAÇÕES AUTOMÁTICAS DE MONITORAMENTO DO AR EM ARAUCÁRIA, PR
 FONTE: A autora (2015)

Para efeito de análise, apenas foram considerados aqueles anos em que mais de 50% dos dados foram registrados, sendo excluído o restante dos dados. O número de dias analisados por variável no presente trabalho, após seleção dos dados, encontra-se na TABELA 5.

TABELA 5 - NÚMERO DE DIAS ANALISADOS POR POLUENTE ATMOSFÉRICO E VARIÁVEL METEOROLÓGICA

Número de dias analisados*									
Local	Poluentes Atmosféricos							Variáveis meteorológicas	
	SO ₂	NO	NO ₂	O ₃	CO	PTS	PI	Temperatura	Umidade
Assis	3077	3015	3008	2745				3095	3011
CSN	2029	2851	2830	3297	1365	1680	3209	3033	733
Repar	418	2956	2950	3394	3362	3098	3166	3013	635
UEG	696	1720	1746	2922	2254		2712	2310	

*Apenas foram considerados os anos em que mais de 50% dos dados foram mensurados nas estações de monitoramento

FONTE: A autora (2015)

Foi realizada a contagem do número de horas que ultrapassaram os níveis de alerta, atenção e emergência estipulados pelas resoluções do CONAMA n° 03/90 (CONAMA, 1990) e SEMA n° 054/06 (SEMA, 2006).

Para caracterização dos padrões de temperatura e umidade no período de estudo, foram consideradas as médias anuais de todas as estações de monitoramento e analisada a tendência de distribuição dos dados.

Foram analisadas as médias horárias e mensais relativas dos poluentes nos anos analisados, com objetivo de caracterizar padrões semelhantes de distribuição das concentrações das variáveis ambientais durante os dias e estações do ano. Essas variáveis foram relativizadas para possibilitar a comparação dos dados, pois são mensuradas em diferentes unidades de medida.

Para a análise das concentrações médias anuais por local de estudo, foram considerados apenas aqueles poluentes mensurados em todas as estações de monitoramento do ar, sendo eles SO₂, NO, NO₂ e CO. Os dados faltantes referentes aos anos em que não houve mensuração foram estimados através da média da concentração do poluente nos anos anteriores ou seguintes, conforme disponibilidade de dados.

Foi realizado o agrupamento das concentrações anuais de poluentes por local de estudo por análise de Cluster. Buscou-se identificar padrões diferenciados de poluição ao longo do tempo. Os grupos foram separados pelo traçado de uma linha paralela ao eixo horizontal no ponto médio da distância Euclidiana, denominada Linha de Fenon (JOHNSON; WICHERN, 1992).

4.4 DIAGNÓSTICO DE CRESCIMENTO DE *A. ANGUSTIFOLIA* SUJEITA À POLUIÇÃO EM POLO INDUSTRIAL

4.4.1 Escolha da espécie

Chagas (2013) considerou alguns critérios para a escolha das espécies a serem amostradas em seu trabalho com anéis de crescimento de árvores nas proximidades de fontes de emissão de poluentes. Segundo o autor, as árvores/espécies devem: (a) ter potencial para o desenvolvimento de estudos dendrocronológicos; (b) ter proximidade às fontes poluidoras; (c) terem idade superior ao início do período de monitoramento da qualidade do ar; (d) estar presente em número mínimo de exemplares para amostragem estatística confiável; (e) estar posicionada no estrato dominante, para eliminar a competição com outras árvores, para evitar situações que reflitam a indução da formação de anéis anuais com características diferenciadas; (f) estar livres de injúrias mecânicas e infestação por agentes xilófagos deterioradores e (g) ter disponibilidade para coleta das árvores em locais livres da influência da poluição atmosférica para serem usadas como controle.

A espécie *A. angustifolia* foi escolhida por apresentar anéis de crescimento visíveis no corte transversal do lenho, conforme já registrado por outros autores (SEITZ; KANNINEN, 1989; MATTOS *et al.*, 2007a, 2007b, 2010; OLIVEIRA, 2007; SANTAROSA *et al.*, 2007; HESS *et al.*, 2009; STEPKA, 2012).

Além disso, *A. angustifolia* está presente na arborização urbana em diferentes municípios no estado do Paraná (EURICH *et al.*, 2014), Rio Grande do Sul (ROMANINI; MELO, 2009), Espírito Santo (FERNANDES, 2013) e Minas Gerais (SANTOS *et al.*, 2007). No município de Araucária, PR, há abundância de árvores da espécie *A. angustifolia*, que são o tema da denominação do município.

4.4.2 Áreas amostradas

As árvores foram amostradas nos arredores das estações de monitoramento do ar, para possibilitar a correlação dos dados fornecidos pelo IAP com o crescimento

arbóreo. Foram traçados polígonos no entorno das estações para delimitar as 4 áreas de estudo (FIGURA 5), conforme a disponibilidade de árvores de *A. angustifolia* e características de uso do solo semelhantes dentro do mesmo polígono, tendo sido os polígonos: ASSIS definido como área residencial; UEG como área comercial/central; CSN como área industrial e; REPAR como área mais afastada e com características rurais.

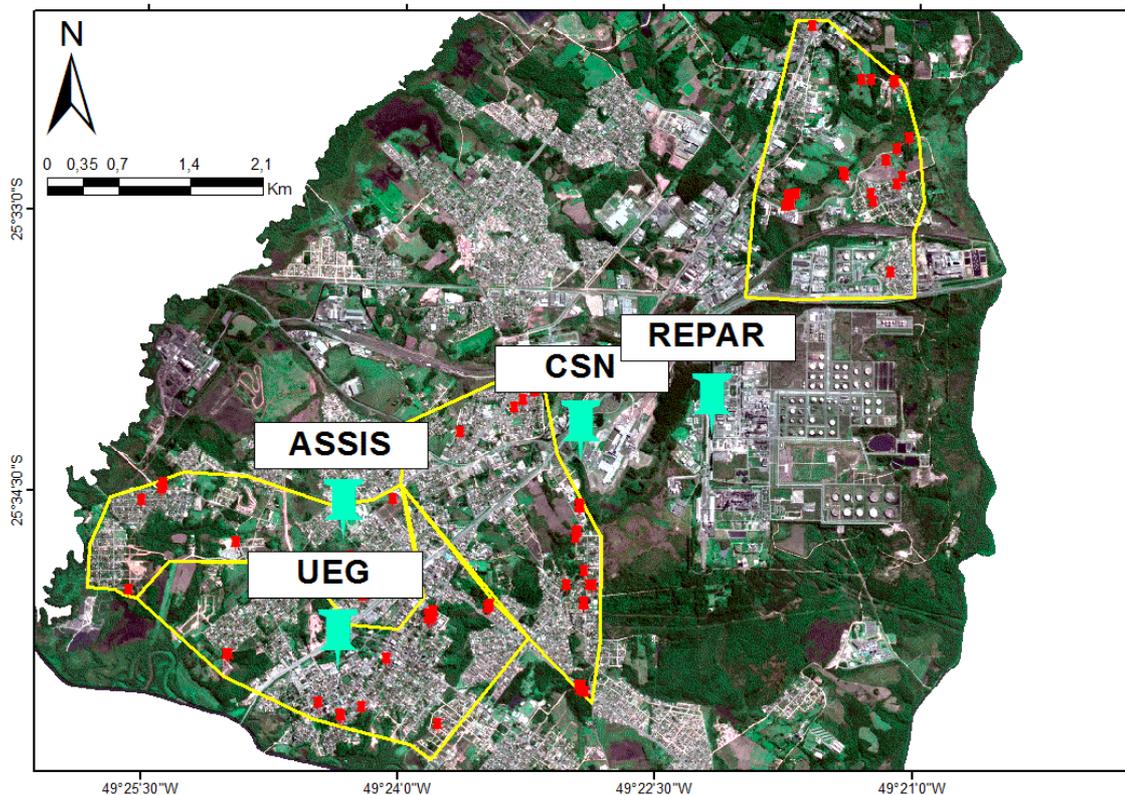


FIGURA 5 - MAPA DOS POLÍGONOS DAS ÁREAS DE COLETA DE AMOSTRAS, NOS ENTORNOS DAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR (AMARELO), ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO DO AR (VERDE) E ÁRVORES AMOSTRADAS (VERMELHO) EM ARAUCÁRIA, PR
 FONTE: A autora (2015)

4.4.3 Coleta de dados dendrométricos

Na primeira etapa do trabalho, foi feita varredura nos polígonos dos entornos das estações de monitoramento escolhidas para o presente estudo em busca das árvores a serem amostradas.

Para cada área, foram selecionadas árvores adultas com diâmetros variáveis, de acordo com a disponibilidade no perímetro urbano do município. Estas foram georreferenciadas com o uso de GPS e registrados os dados de diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) e altura (TABELA 6).

É indicado um número de 30 amostras para realização dos testes estatísticos mais utilizados pois, dessa forma, o valor crítico de $t_{0,05}$ é de 1,699 é numericamente próximo a $z_{0,05}$, de 1,96, da distribuição normal estandarizada (MENDENHALL, 1971). Portanto, no presente trabalho foram coletadas em torno de 35 amostras por local de estudo para que as amostras sobressalentes substituíssem aquelas que eventualmente poderiam ser descartadas devido à impossibilidade de visualização dos anéis de crescimento.

TABELA 6 - DADOS DENDROMÉTRICOS DE *A. ANGUSTIFOLIA* COLETADOS NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR

Área de Coleta	Número de amostras	Altura média (m)	DAP _{médio} (cm)	DAP _{mín} (cm)	DAP _{máx} (cm)
ASSIS	39	14,0	51,3	16,5	86,9
CSN	35	15,3	44,9	31,0	65,2
REPAR	35	14,3	45,0	25,1	89,1
UEG	35	15,5	55,6	27,4	83,7

FONTE: A autora (2015)

4.4.4 Coleta, medição e datação das amostras não destrutivas

As amostras não destrutivas foram coletadas com trado de Pressler à altura de 1,30 m do solo. De cada árvore, foram retirados dois rolos de incremento em sentido ortogonal (Norte e Oeste), deslocados 10 cm um do outro.

Os orifícios gerados pela coleta de amostras foram fechados com cera de abelha, para evitar a entrada de agentes xilófagos (STEPKA, 2012).

Os rolos de incremento foram secos à temperatura ambiente por 40 dias, sendo então foram fixados em suportes específicos. Depois de fixados, foram polidos progressivamente, para facilitar a visualização quando na marcação dos anéis de crescimento. A medição dos anéis de crescimento foi feita utilizando-se mesa de

mensuração LINTAB, com precisão de 0,01 mm (RINN, 1996), disponibilizada pelo Laboratório de Anatomia da Madeira e Dendrocronologia da Embrapa Florestas.

Após a medição, os anéis foram visualmente datados entre amostras da mesma árvore e posteriormente entre árvores. Na datação, são alinhados sinais comuns de crescimento entre as amostras na representação gráfica das séries. Esse procedimento é necessário para que sejam corrigidos erros de sincronização entre os anéis de crescimento, que são comuns, particularmente em amostras não destrutivas.

4.4.5 Análise do crescimento

Foram analisados os incrementos médios anuais das últimas décadas, tendo sido considerados para análise apenas os incrementos referentes aos diâmetros superiores a 10 cm, uma vez que o crescimento na fase juvenil pode superestimar o resultado médio final.

Na maioria das amostras houve deterioração da casca das árvores e por isso foi necessário estimar suas dimensões. A espessura da casca das árvores foi estimada segundo equação proposta por Nascimento *et al.* (2010), em que se considera a seguinte relação linear entre o diâmetro e a casca de *A. angustifolia* em fragmento de floresta nativa na região urbana de Curitiba:

$$dap_{s/c} = -6,0302 + 0,9707dap_{c/c} \quad (1)$$

Em que: $dap_{s/c}$ é o diâmetro sem casca e; $dap_{c/c}$ o diâmetro com casca.

Com a obtenção das séries de crescimento e diâmetro final, foi possível gerar os dados de diâmetro retroativo das árvores ano a ano. Como foi identificada grande variação dos dados devido ao tamanho irregular das árvores amostradas, optou-se nesse trabalho pela estratificação das amostras em três classes diamétricas em cada local de estudo (TABELA 7).

TABELA 7 - CARACTERIZAÇÃO DO CRESCIMENTO DAS ÁRVORES AMOSTRADAS POR CLASSE DIAMÉTRICA E POR LOCAL DE ESTUDO

Local	Classe de DAP (cm)	Número de árvores amostradas
ASSIS	20 - 40	5
	40 - 60	8
	60 - 80	8
CSN	20 - 40	7
	40 - 60	16
	60 - 80	3
REPAR	20 - 40	13
	40 - 60	14
	60 - 80	4
UEG	20 - 40	5
	40 - 60	14
	60 - 80	11

FONTE: A autora (2015)

Para amenizar os efeitos do número reduzido de amostras em cada classe diamétrica, foi utilizado o procedimento bootstrap (DAVIDSON; HINKLEY, 1997), em que foi simulada a trajetória de crescimento de 100 árvores em cada classe diamétrica e em cada local de estudo, refazendo combinações entre os anéis de crescimento das árvores amostradas. Essa técnica já foi utilizada com séries de crescimento de árvores por Brienem (2005), Mattos *et al.* (2015), dentre outros.

Para análise do crescimento, foram testados modelos de regressão do diâmetro em função da idade (TABELA 8) para gerar equações de crescimento para cada local estudado. Para a comparação do crescimento entre áreas, foi escolhido o mesmo modelo de crescimento para todas as classes diamétricas e locais de estudo. O modelo foi escolhido por estar dentre os que apresentaram os melhores parâmetros estatísticos do ajuste de regressão (coeficiente de determinação – R^2 , erro padrão da estimativa - Syx e valor de F) e adequação aos dados reais em todas as áreas. As equações foram comparadas entre si pelos limites de confiança dos parâmetros do modelo.

TABELA 8 - EQUAÇÕES DE CRESCIMENTO DIAMÉTRICO TESTADAS EM FUNÇÃO DA IDADE

Denominação da Equação	Modelo	Restrições dos parâmetros
Gompertz	$dap = \beta_0 e^{-\beta_1 e^{-\beta_2 i}}$	$\beta_2 > 0$
Johnson-Schumacher	$dap = \beta_0 e^{-\frac{\beta_1}{i+\beta_2}}$	$\beta_1 > 0$
Linear	$dap = \beta_0 + \beta_1 i$	$\beta_1 > 0$
Logística	$dap = \frac{\beta_0}{(1 + \beta_1 e^{-\beta_2 i})}$	$\beta_2 > 0$
Monomolecular	$dap = \beta_0 (1 - \beta_1 e^{-\beta_2 i})$	$\beta_2 > 0$
Richards	$dap = \beta_0 (1 - \beta_1 e^{-\beta_2 i})^{\frac{1}{1-\beta_3}}$	$\beta_2 > 0$
Schumacher	$dap = \beta_0 e^{-\frac{\beta_1}{i}}$	$\beta_1 > 0$

sendo “DAP” o diâmetro a 1,30 m do solo, “i” a idade; “ β_0 , β_1 , β_2 e β_3 ” os parâmetros das equações e “e”, número de Euler

FONTE: Burkhart; Tomé (2012)

4.4.6 Resposta às variáveis ambientais

Para efeito de análise, foram considerados apenas os poluentes registrados em todas as estações de monitoramento (NO, NO₂, SO₂ e O₃), evitando-se, dessa forma, lacunas para a comparação entre os locais de estudo. Da mesma forma, considerou-se apenas os dados meteorológicos de temperatura, pois foi a única variável mensurada em todas as estações de monitoramento. Os dados de médias anuais faltantes de uma ou mais variáveis foram estimados pela média dos registros dos anos seguintes.

As variáveis anuais, incremento por classe diamétrica, médias de concentração de poluentes e temperatura média, foram relacionadas entre si por correlação de Pearson a 95% de probabilidade, com objetivo de identificar aquelas variáveis que contribuíram significativamente com o crescimento das árvores nos anos analisados. Os valores de correlação indicam o nível de relação linear entre as variáveis.

A partir das variáveis correlacionadas com o incremento arbóreo, foram ajustados modelos de regressão linear múltipla para descrever a relação entre o incremento arbóreo e as variáveis ambientais. Apenas as variáveis que apresentaram o p-valor inferior a 0,10 foram consideradas para a construção do modelo, pois são estatisticamente significativas a um nível de 90% de probabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA FLORESTAL DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR

5.1.1 Acurácia da classificação supervisionada

A exatidão global da classificação das imagens foi de 99,17% para as imagens SPOT e de 99,2% para as imagens RapidEye, sendo o índice Kappa de 98,33% e 98,30%, respectivamente (TABELAS 9 e 10).

Ainda que com imagens provenientes de distintos satélites, a acurácia obtida pela classificação por máxima verossimilhança foi satisfatória para a quantificação temporal das áreas florestais do município, como pode ser observado nas tabelas números 9 e 10. A acurácia do produtor na classificação dos remanescentes florestais foi de 98,79% para as imagens SPOT e 96,71% para RapidEye e a acurácia do usuário de 99,50% e 99,99%, respectivamente, indicando alta precisão na classificação dos remanescentes arbóreos.

TABELA 9 - MATRIZ DE CONFUSÃO E COEFICIENTES ESTATÍSTICOS DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DAS IMAGENS SPOT, DO ANO DE 2005

SPOT	Pixel de referência (selecionado pelo autor)			
	Classes de uso do solo	Remanescente florestal	Outros usos do solo	Total
Remanescente florestal		34.830	175	35.005
Outros usos do solo		428	36.792	37.220
Total		35.258	36.967	72.225
Acurácia do Produtor		98,79%	99,53%	
Acurácia do Usuário		99,50%	98,85%	
Exatidão global			99,17%	
Índice de Kappa			98,33%	

FONTE: A autora (2015)

TABELA 10 - MATRIZ DE CONFUSÃO E COEFICIENTES ESTATÍSTICOS DA CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DAS IMAGENS RAPIDEYE, DO ANO DE 2012

RapidEye	Pixel de referência (selecionado pelo autor)			
	Classes de uso do solo	Remanescente florestal	Outros usos do solo	Total
Remanescente florestal		31.641	2	31.643
Outros usos do solo		1075	37.700	38.775
Total		32.716	37.702	70.418
Acurácia do Produtor		96,71%	99,99%	
Acurácia do Usuário		99,99%	97,23%	
Exatidão global			99,20%	
Índice de Kappa			98,30%	

FONTE: A autora (2015)

Os resultados foram compatíveis aos já registrados por Myeong *et al.* (2001) para a classificação da cobertura do solo de Syracuse, nos Estados Unidos, onde obtiveram 80% de exatidão global para imagens de alta resolução. Os autores afirmam que obtiveram sucesso com a metodologia de classificação supervisionada do uso do solo do município, apesar dos inúmeros desafios inerentes às imagens de alta resolução espacial. Ainda, de acordo com os autores, os silvicultores urbanos consideram esses resultados muito úteis quando se tratam áreas como blocos, setores censitários, bairros e em nível de município, ainda que sejam necessárias melhorias em termos de precisão, quando se deseja obter informações de áreas de pixels individuais.

Para a obtenção de índices maiores de precisão, seria indicado o uso de imagens de maior resolução espacial (inferior a um metro) e provenientes do mesmo satélite. Informações sobre a altura de objetos, provenientes de LiDAR (Light Detection And Ranging) ou processamentos fotogramétricos, também poderiam aumentar a precisão da classificação espacial, por possibilitarem a separação entre árvores, arbustos e vegetação rasteira e água, telhados escuros e asfalto (MYEONG *et al.*, 2001). Ainda assim os mapas apresentaram precisão satisfatória para a análise temporal das áreas vegetadas predominantemente por árvores em nível de município e blocos de zoneamento urbano.

5.1.2 Caracterização das áreas florestais do município

Observou-se um decréscimo de áreas arborizadas no município entre os períodos de 2005 e 2012, havendo redução de 218,73 ha de vegetação arbórea contínua, o que representa 10,70% do existente em 2005 (TABELA 11). Houve um ganho de 336,63 ha de florestas, porém, houve uma perda de 553,75 ha no período estudado, o que representa 16,46% e 27,08% respectivamente da área total de florestas existente em 2005 no perímetro urbano do município de Araucária, PR.

TABELA 11 - QUANTIFICAÇÃO DAS DISTINTAS ÁREAS DE USO DO SOLO NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA

Remanescentes florestais	Área (ha)	Área (%)
2005	2.044,82	100,00
2012	1.826,09	89,30
Perda entre 2005 e 2012	553,75	27,08
Ganho entre 2005 e 2012	336,63	16,46

FONTE: A autora (2015)

A supressão da vegetação arbórea no município é claramente observada na FIGURA 6, em que se observa as áreas de floresta que foram adicionadas (amarelo) e suprimidas (vermelho) no município no período de 7 anos. Na imagem também é possível observar as áreas em que não houve alteração visível (verde) nas imagens analisadas no período.

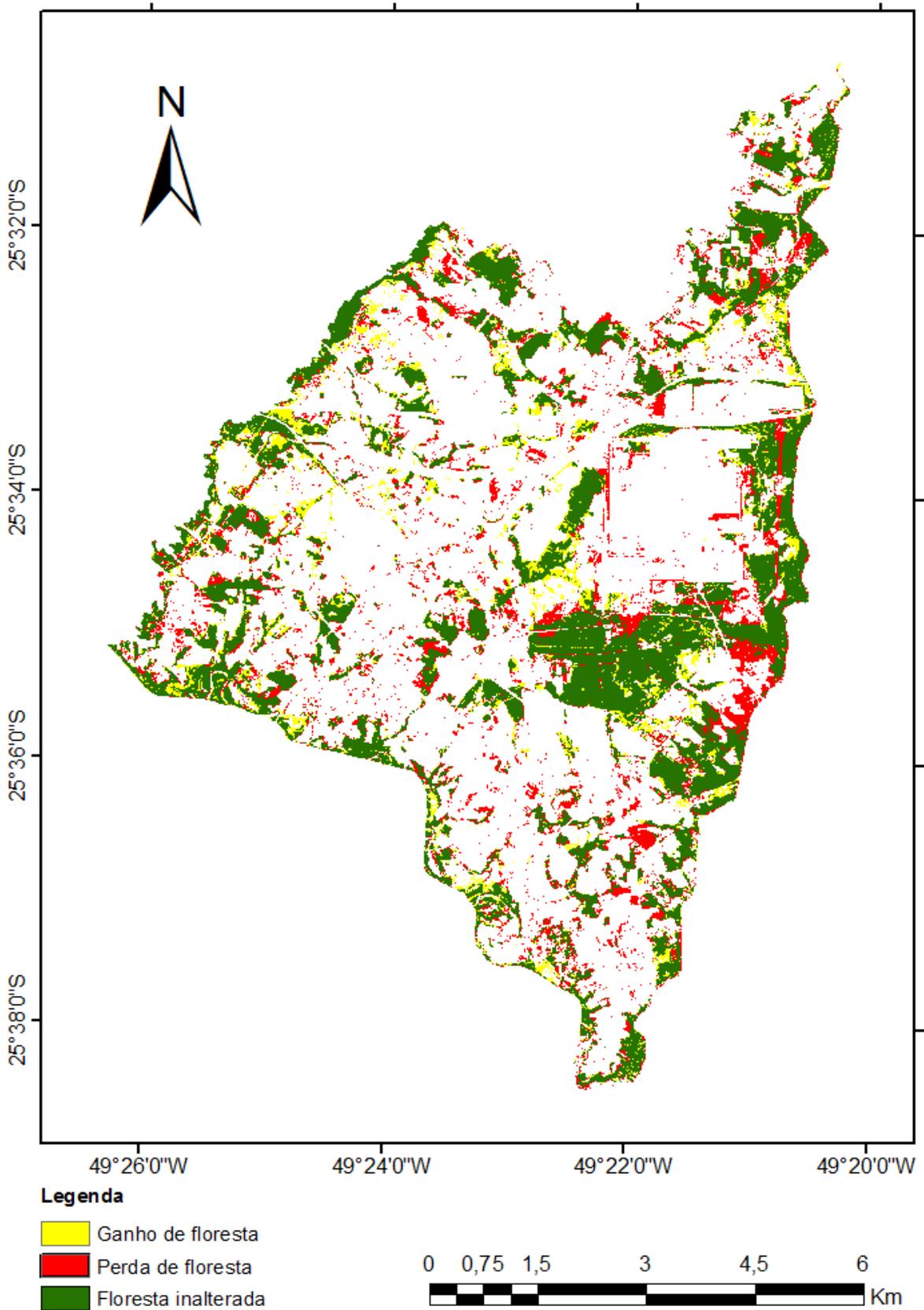


FIGURA 6 - MAPA DA QUANTIFICAÇÃO DE FLORESTAS ENTRE OS ANOS DE 2005 E 2012 NO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR
FONTE: A autora (2015)

A zona de proteção ambiental no município é a que proporcionalmente apresenta maior área de remanescentes florestais, se aproximando à metade da área total com cobertura florestal (TABELA 12). A zona industrial é a segunda com maior cobertura de florestas, com aproximadamente 35% de sua área coberta com predomínio de copas de árvores. As zonas residencial, setor de serviços e comercial são proporcionalmente menos vegetadas por árvores, não ultrapassando 25% de sua área com uso de solo florestal.

Entre os anos de 2005 e 2012, houve redução de cobertura florestada em todas as zonas de uso do solo, com exceção da área ocupada pelo setor de serviços, que aumentou em 1% sua área de florestas. A zona residencial foi a que apresentou maior supressão da vegetação entre os anos de 2005 e 2012, tendo sido a área florestal reduzida em 4,67%. A zona de proteção ambiental permaneceu semelhante no período estudado, tendo reduzido apenas 0,30% de sua área florestada.

As modificações de vegetação foram maiores em superfície nas áreas industrial e residencial são mais extensas, somando aproximadamente 300 ha de perda de vegetação no período estudado, enquanto houve ganho de apenas 200 ha, gerando saldo negativo de florestas no período estudado (TABELA 12).

TABELA 12 - ÁREAS COM PREDOMÍNIO DE VEGETAÇÃO ARBÓREA POR CLASSES DE USO DO SOLO, SEGUNDO ZONEAMENTO URBANO (PARANÁ, 2010)

Zoneamento do município	Área total (ha)	Área de florestas (ha)				
		2005	2012	Ganho	Perda	Diferença
Setor de serviços	595,00	104,23	112,24	38,76	30,77	7,99
Zona comercial	176,81	26,52	20,91	3,21	8,67	-5,45
Zona de proteção ambiental	997,23	485,53	482,29	91,42	94,45	-3,04
Zona industrial	2.307,95	795,23	708,26	120,28	207,33	-87,05
Zona residencial	2.774,43	632,26	501,60	82,79	212,23	-129,44
TOTAL	6.851,42	2.043,78	1.825,30	336,46	553,44	-216,98

FONTE: A autora (2015)

A taxa de crescimento populacional do município de Araucária é de 2,4% ao ano enquanto a do Estado do Paraná é de 1,8% ao ano (RODRIGUES *et al.*, 2013). O aumento da população, seguido de supressão das florestas urbanas do município, pode acarretar em um risco para a saúde da população. O município de Araucária precisa de especial atenção quanto à poluição, uma vez que é predominantemente industrial (NEGRELLI, 2004) e, portanto, está mais sujeito à poluição do ar.

Nowak *et al.* (2006) sugerem que, embora seja uma pequena porção de poluição retirada pelas florestas, os benefícios gerados justificam o empenho das autoridades locais em conservar e incentivar a cobertura arbórea do município.

Nos Estados Unidos, foi registrado o aumento da qualidade do ar de acordo com a cobertura arbórea da cidade. Em algumas cidades, locais completamente cobertos por árvores (remanescentes florestais) apresentaram cerca de 16% de melhora nas concentrações de O₃, 9% de NO₂, 8 % de matéria particulada e 0,03% de CO (NOWAK *et al.*, 2006).

Ainda que submetidas às diversas condições negativas do local, árvores podem sobreviver e prosperar em áreas industriais quando há medidas favoráveis a seu desenvolvimento, conforme demonstrado por Poracsky (1999).

Os planos diretores dos municípios deveriam estabelecer um sistema de implantação e monitoramento das florestas urbanas, priorizando o plantio de espécies com maior adaptação às áreas mais poluídas.

5.2 ANÁLISE TEMPORAL DAS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Em Araucária, considerando as 4 estações de monitoramento do ar em estudo, o número de horas que ultrapassaram os limites estipulados pelas resoluções CONAMA N°03/90 e SEMA N° 054/06 (TABELA 13), não foram superiores a 0,5% (TABELA 14) no período de 2003 a 2013. Esses valores indicam que a poluição do ar no município encontra-se dentro de níveis aceitáveis, conforme estipulado por lei brasileira, e que possivelmente as medidas de proteção tomadas pelas indústrias e governo foram eficientes nesse período, pois está sendo mantida a qualidade mínima aceitável.

Os limites de concentração de poluentes estipulados pela legislação brasileira são mais flexíveis do que os estipulados pelas leis americana e europeia de qualidade do ar (TABELA 13). Ainda assim, não houve mais do que 3% de extrapolações ao limite máximo estipulado pelos Estados Unidos ou pela União Europeia (TABELA 14).

TABELA 13 - LIMITES DE CONCENTRAÇÕES DE POLUENTES NO AR ESTIPULADOS PARA O BRASIL, ESTADOS UNIDOS E EUROPA

Poluente	Tempo de amostragem	Brasil ¹			EUA ²	Europa ³
		Nível de Atenção	Nível de Alerta	Nível de Emergência		
PTS (ppb)	24 horas	375	625	875	150	
PI (ppb)	24 horas	250	420	500	35	
SO₂ (ppb)	24 horas	800	1.600	2.100		125
CO (ppm)	8 horas	15	30	40	9	15
O₃ (ppb)	1 hora	400	800	1.000	240	120
NO₂ (ppb)	1 hora	1.300	2.260	3.000	100	200

¹CONAMA (1990); ²US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA) (2006); ³EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL (2008)

FONTE: A autora (2015)

TABELA 14 – PERCENTUAL DE HORAS COM VALORES ACIMA DOS NÍVEIS CRÍTICOS DE CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES DO AR NO PERÍODO DE 2003 A 2013 CONSIDERANDO CRITÉRIOS DO BRASIL, ESTADOS UNIDOS E UNIÃO EUROPEIA

Níveis	Porcentagem de horas acima do limite						
	SO ₂	NO	NO ₂	O ₃	CO	PTS	PI
Nível de Atenção	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,343	0,159
Brasil							
Nível de Alerta	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,007	0,023
Nível de Emergência	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,010
EUA		2,805	0,368	0,000	0,030		
Europa	0,802	0,547	0,010	0,001	0,000		

FONTE: A autora (2015)

Foi registrada entre os anos de 2003 e 2013 uma tendência de aumento da temperatura e de decréscimo de umidade relativa do ar (FIGURA 7), resultado também encontrado por outros autores para a região metropolitana de São Paulo (PEREIRA FILHO *et al.*, 2007). O aquecimento global do ar atmosférico é fenômeno

observado por diversos autores. Em reconstrução climática do primeiro milênio na China, Shi *et al.* (2012) puderam concluir que o aquecimento da temperatura no final do século XX excedeu qualquer período do passado nos últimos 1.000 anos.

Potcher e Ben-Shalom (2013) também registraram o aumento da temperatura entre os anos de 1967 e 2007 na cidade de Beer-Schiva, Israel, porém houve também o aumento da umidade relativa do ar, efeito oposto ao encontrado no presente trabalho. Os autores observaram que essas mudanças nas características meteorológicas atmosféricas foram fatores de aumento de estresse pela população em áreas urbanas, o que os permitiu inferir que o número de horas de conforto térmico (geralmente nas horas noturnas) reduzirá gradativamente no decorrer dos próximos anos. Por fim, os autores sugerem que os planejadores urbanos se atentem às condições crescentes de desconforto térmico quando iniciarem novos projetos de construção nas cidades.

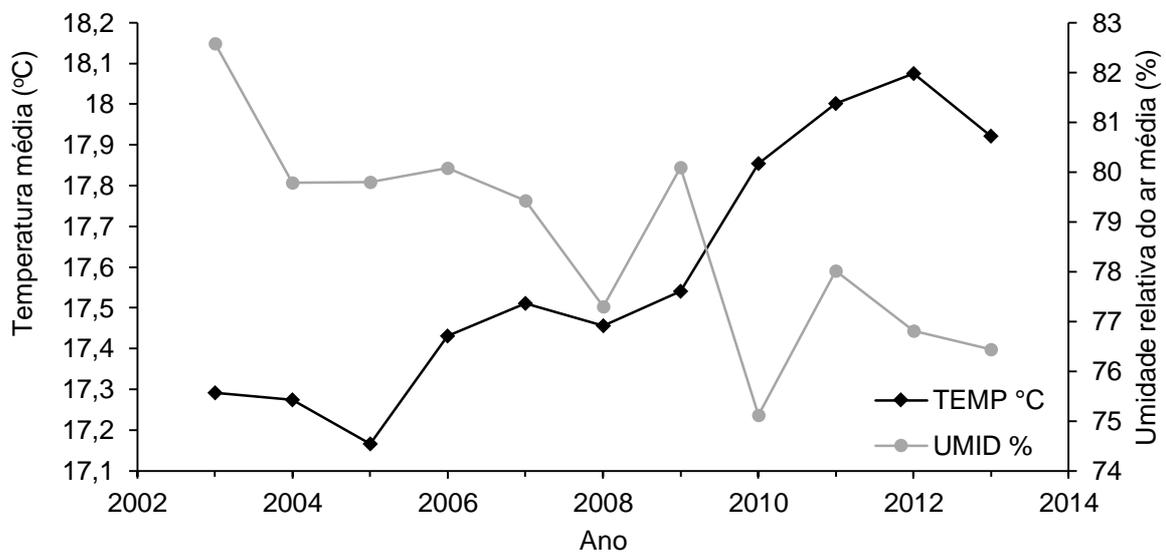
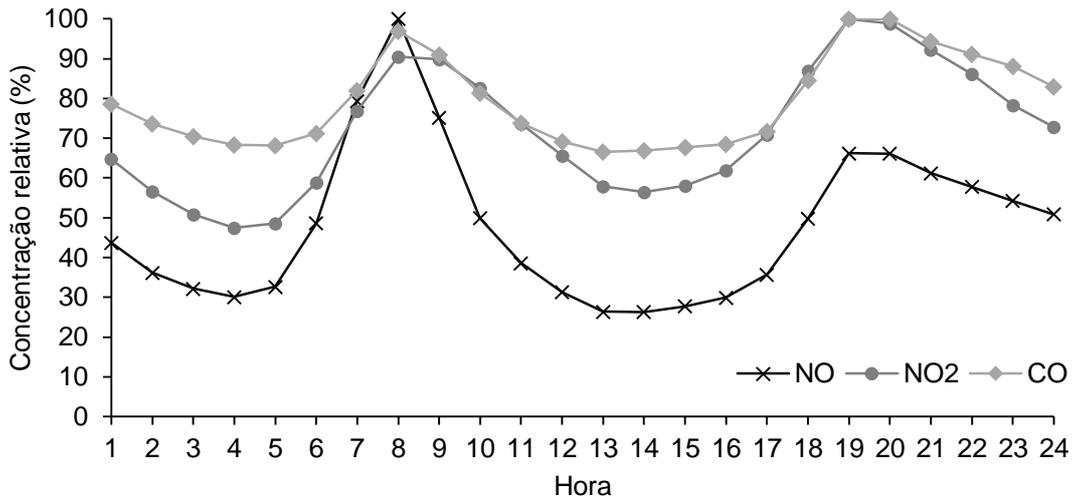
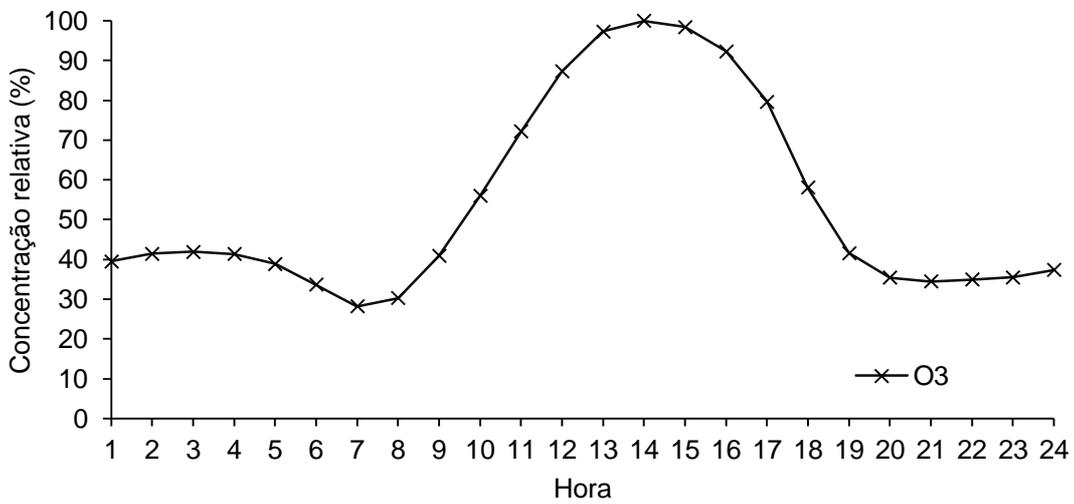


FIGURA 7 - VALORES MÉDIOS ANUAIS DE TEMPERATURA E UMIDADE ENTRE OS ANOS DE 2003 E 2012 NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR
 FONTE: A autora (2015)

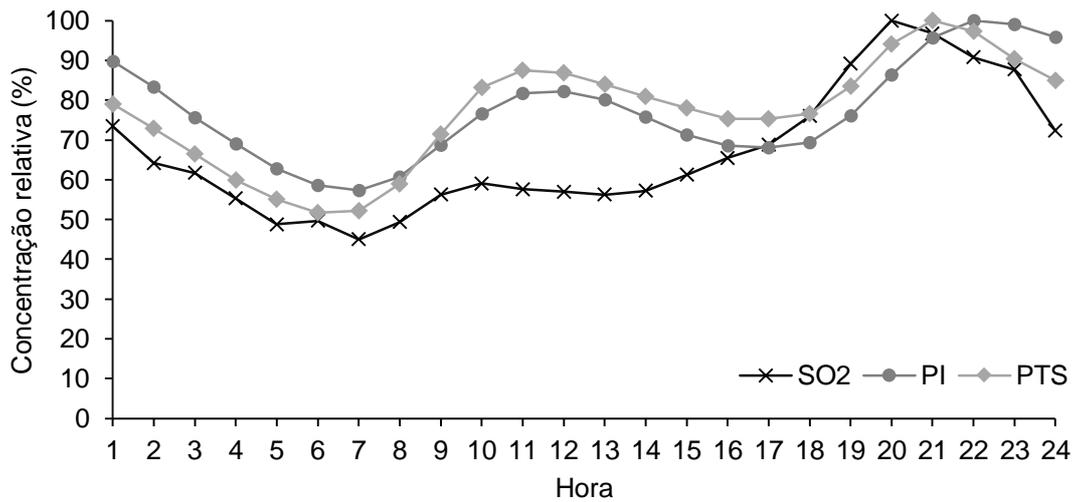
A concentração de poluentes do ar segue ciclos típicos anuais, semanais e diurnos (MAYER, 1999). Foram encontrados 3 padrões de distribuição da concentração de poluentes do ar ao longo do dia (FIGURA 8).



a



b



c

FIGURA 8 - CONCENTRAÇÕES MÉDIAS HORÁRIAS DOS POLUENTES DO AR ENTRE OS ANOS DE 2003 E 2012 NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR
 FONTE: A autora (2015)

O primeiro grupo, composto por NO, NO₂ e CO (FIGURA 8a), apresenta maior concentração nos horários em que há maior deslocamento diário da população no município, associado aos horários de início e término de expediente de trabalho e, conseqüentemente, maior concentração de veículos em uso, uma vez que a principal fonte de emissão desses poluentes é a queima de combustíveis fósseis provenientes de automóveis (FLAGAN; SEINFELD, 1988; CHEREMISINOFF, 2002).

Mayer (1999) estudou os padrões de distribuição dos óxidos de nitrogênio em Stuttgart, Alemanha, durante as horas dos dias e os dias da semana e encontrou padrões de distribuição da concentração principalmente associado aos horários de maior tráfego de veículos. Segundo o autor, o ciclo diurno dos óxidos de nitrogênio tem formato de “ondas duplas” (conforme observado no presente trabalho na FIGURA 8a), sendo os dois picos de concentração nos horários de maior tráfego de veículos. Os óxidos de nitrogênio no inverno também foram mais concentrados nesses horários na região metropolitana de Tóquio, conforme analisado por Uno *et al.* (1996). Além disso, as concentrações desses compostos são maiores nos dias da semana do que nos finais de semana, conforme esperado pelo maior trânsito de automóveis nos dias úteis.

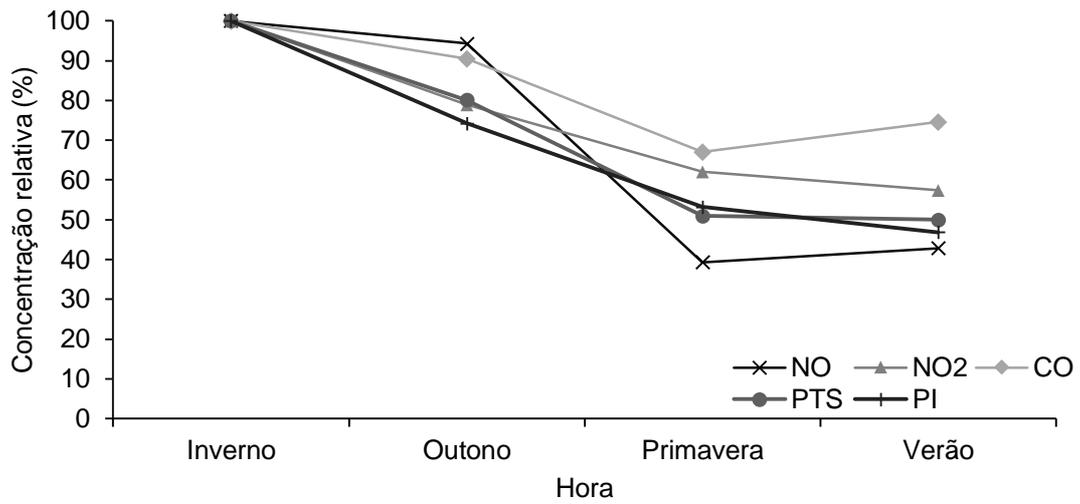
O componente O₃ (FIGURA 8b) é mais concentrado na atmosfera entre 12 h e 16 h, quando a temperatura é maior e aumentam os níveis de radiação e raios ultravioletas, além de haver um decréscimo na umidade relativa do ar. As moléculas de O₃ absorvem partículas de radiação e são formadas a partir de reações fotoquímicas da luz solar com óxidos de nitrogênio, facilitada por uma variedade de compostos orgânicos voláteis (VOCs). Suas concentrações são influenciadas pela intensidade da radiação solar e concentrações absolutas de NO e VOCs (CHEREMISINOFF, 2002), o que justifica as maiores concentrações nos períodos mais quentes do dia. Uno *et al.* (1996) observaram comportamento semelhante na concentração diária de O₃ na região metropolitana de Tóquio.

O terceiro grupo é composto por SO₂, PI e PTS (FIGURA 8c). Nesse grupo, as concentrações são maiores no período noturno, quando a temperatura é menor e a umidade relativa maior, causando um adensamento das partículas sólidas, que ficam mais concentradas na superfície. Como as principais fontes desses compostos são estacionárias (FLAGAN; SEINFELD, 1988; CHEREMISINOFF, 2002), sua emissão é equilibrada durante o dia, uma vez que a produção das indústrias é distribuída ao longo do dia e geralmente ocorre o dia todo. Portanto, a concentração desses

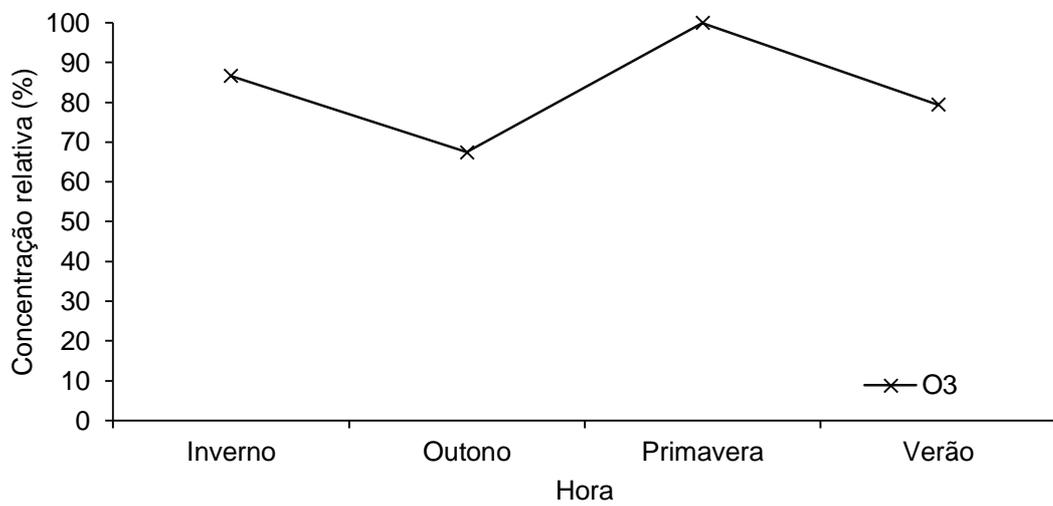
poluentes está sujeita às condições físicas do ar, e não ao horário em que são emitidos, como é o caso do grupo 1.

Os períodos mais críticos dos poluentes aéreos foram divididos em 3 grupos dentro do ano (FIGURA 9). O primeiro grupo, formado pela maioria dos poluentes (FIGURA 9a), é mais concentrado nos meses mais frios, quando as partículas estão mais adensadas. Segundo Mayer (1999), o verão com temperaturas mais altas favorece a troca de massas de ar na atmosfera, permitindo uma reciclagem melhor dos poluentes do ar. No Japão, as altas concentrações de NO e material particulado no inverno compõem parte das maiores preocupações ambientais do país, especialmente na área metropolitana de Tóquio (UNO *et al.*, 1996).

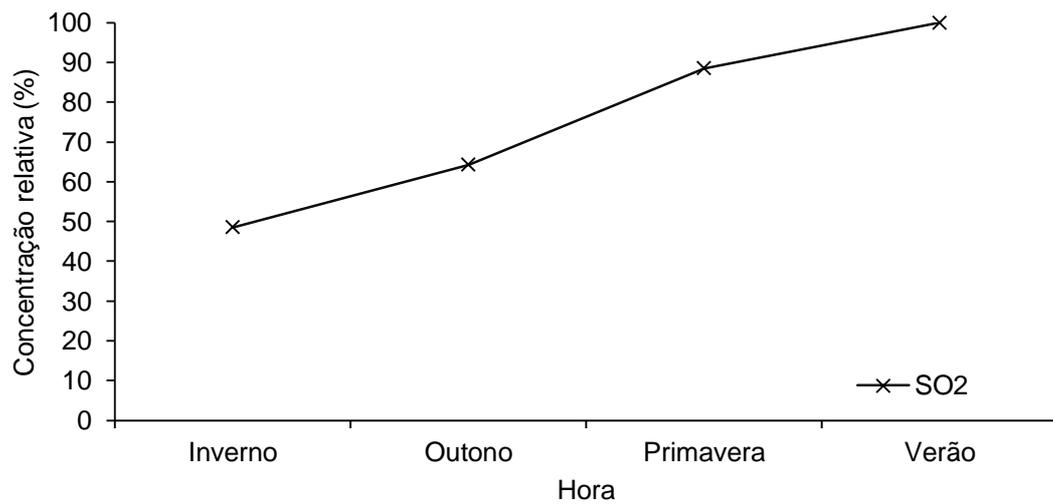
O segundo grupo é composto pelo O₃ (FIGURA 9b), que possui seus níveis mais críticos nos meses da primavera, também coincidindo com o período em que a radiação global e os raios ultravioletas são mais fortes. Conforme observado por Mayer (1999), a concentração de O₃ é menor nos meses mais frios, como consequência do clima local, caracterizado por maior nebulosidade e menores quantidades de radiação recebida na atmosfera. O terceiro grupo é do SO₂ (FIGURA 9c), que tem seu período mais crítico nos meses de verão, com a temperatura mais quente e elevados teores de umidade.



a



b



c

FIGURA 9 - CONCENTRAÇÃO RELATIVA DOS POLUENTES DO AR POR ESTAÇÃO DO ANO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR
 FONTE: A autora (2015)

Considerando os dados de concentração relativa média dos poluentes do ar por local e por ano, foram determinados 5 agrupamentos diferenciados (FIGURA 10). Os grupos 1 e 2 concentraram todos os anos do local de estudo Assis. Nos grupos 3, 4 e 5 estão representados todos os anos referentes aos locais de estudo REPAR, UEG e CSN, respectivamente. Algumas parcelas de CSN foram confundidas com parcelas da REPAR, o que pode ser justificado pela proximidade das estações de monitoramento. Entretanto, ficou evidente que as variáveis relativas às concentrações de poluentes mostraram-se diferenciadas por local de estudo ao longo dos anos.

A marcada diferenciação dos padrões de poluição nas estações de monitoramento da qualidade do ar no período de 2003 a 2013 mostra que a estrutura da poluição foi diferente em cada local. Portanto, a análise por local de estudo é importante para representar as diferentes condições de poluição à que as árvores estão submetidas.

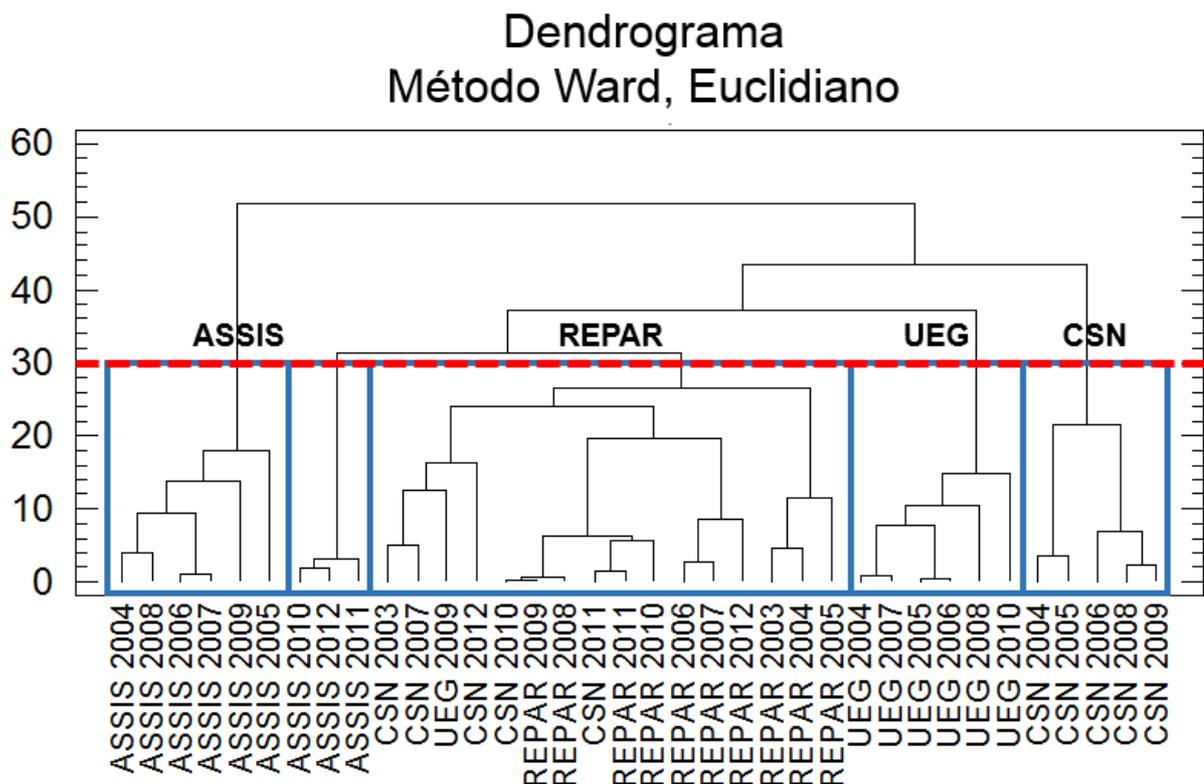


FIGURA 10 - PADRÃO DE CONCENTRAÇÃO RELATIVA DOS POLUENTES DO AR DISTRIBUÍDO POR ANÁLISE CLUSTER NAS ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO NO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR

FONTE: A autora (2015)

5.3 DIAGNÓSTICO DE CRESCIMENTO DE *A. ANGUSTIFOLIA* SUJEITA À POLUIÇÃO EM POLO INDUSTRIAL

5.3.1 Estudo dendrocronológico

Os anéis de crescimento do lenho de *A. angustifolia* são visíveis e, em geral, apresentam limites de crescimento anuais bem demarcados e perceptíveis a olho nu (FIGURA 11a), o que é esperado para a espécie. Porém, nas amostras provenientes de regiões mais próximas ao centro do município (UEG e CSN), foram detectados trechos de menor distinção entre o lenho inicial e lenho tardio (FIGURA 11b), principalmente na porção mais próxima à casca da árvore, formada mais recentemente. Em alguns desses trechos foi possível estimar visualmente o número de anéis de crescimento faltantes, que foram posteriormente confirmados pela datação cruzada.

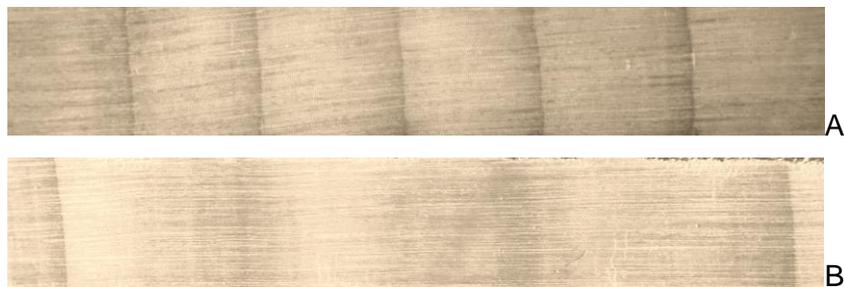


FIGURA 11 - ILUSTRAÇÃO DOS ANÉIS DE CRESCIMENTO DE *A. ANGUSTIFOLIA* BEM DEMARCADOS (A) E TRECHOS DE MENOR DISTINÇÃO (B) EM ÁREA URBANA
FONTE: A autora (2015)

É comum em áreas urbanas, onde muitas variáveis influenciam sinergicamente o crescimento arbóreo, que as árvores não respondam aos estímulos climáticos como normalmente acontece em ambiente de floresta natural (WILCZYNSKI, 2006; CHAGAS, 2013). Em área urbana no sul da Polônia (WILCZYNSKI, 2006), houve redução no crescimento de *P. sylvestris*, evidenciada principalmente por alta variação na largura dos anéis, baixa semelhança entre cronologias e falta de anos com sinais comuns. Após 1990, o autor constatou que o controle da poluição atmosférica refletiu

instantaneamente nos anéis de crescimento, principalmente naquelas localidades onde o estresse inicial devido à poluição do ar era mais grave. A partir dessa década, as árvores de *P. sylvestris* passaram a produzir anéis mais largos, quando foi observada homogeneidade de crescimento e os sinais comuns entre anéis se tornaram mais evidentes.

Chagas (2013), em estudo dendrocronológico com as espécies *Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (Benth.) G.P. Lewis e *Tabebuia pentaphylla* (L.) Hemsl. em áreas urbanas no município de Paulínia, SP, associou os falsos anéis e anéis incompletos encontrados às condições adversas do ambiente urbano, como impermeabilização e compactação do solo, teor desequilibrado de minerais e menores percentagens de matéria orgânica no solo, condições meteorológicas distintas, competição por água e nutrientes, podas, injúrias mecânicas, prolongamento do fotoperíodo com a iluminação artificial, poluição, dentre outros.

Em estudo sobre o crescimento de árvores de *Quercus virginiana* Mill. em áreas urbanizadas na Flórida, Estados Unidos, a transição entre vasos pequenos e grandes foi selecionada como o critério de identificação dos anéis de crescimento, uma vez que os limites demarcados por parênquima terminal não eram sempre visíveis (BARTENS *et al.*, 2012). Como as amostras foram coletadas de árvores que crescem em condições muito heterogêneas, típicas dos ecossistemas urbanos, era esperada a variação considerável nas taxas de crescimento, sendo observada baixa correlação entre as séries. Segundo os autores, podas, vandalismo e infestações de insetos podem afetar o crescimento das árvores, além dos fatores específicos do local. Foi criada uma cronologia com apenas aquelas amostras que apresentaram maiores correlações interséries, resultando numa correlação média de 0,654, sendo consideradas 27 árvores. As árvores que cresceram em condições semelhantes foram as que apresentaram melhor correlação entre si.

Devido aos trechos com anéis de crescimento confusos e de menor distinção, algumas amostras coletadas foram descartadas (TABELA 15), pois não foi possível estabelecer a datação cruzada de forma consistente. Portanto, apenas as árvores que responderam aos sinais comuns detectados na datação cruzada foram consideradas para o estudo do crescimento da espécie, conforme sugerido por Bartens *et al.* (2012). Ainda assim, o número de árvores que participaram das séries cronológicas permaneceu próximo a 30 sendo mensurados mais de 900 anéis de crescimento por local de estudo.

TABELA 15 - DESCRIÇÃO QUANTITATIVA DAS SÉRIES CRONOLÓGICAS MENSURADAS NOS LOCAIS DE ESTUDO

Área de Coleta	Árvores coletadas	Árvores eliminadas	Árvores da série cronológica	Anéis de crescimento mensurados	Período da série cronológica
ASSIS	39	18	21	991	1945 - 2012
CSN	35	9	26	1.299	1937 - 2012
REPAR	35	6	29	1.147	1944 - 2012
UEG	35	5	30	1.700	1930 - 2012

FONTE: A autora (2015)

5.3.2 Análise do crescimento

Quando analisado o crescimento arbóreo de todos os locais ao longo das últimas décadas e suas tendências lineares (FIGURA 12e), percebe-se um declínio gradual nos valores dos incrementos. Porém, quando a análise é feita separadamente por local de estudo, observa-se um crescimento ainda ascendente em árvores da região da REPAR (FIGURA 12c). Nas demais regiões percebe-se um declínio gradual nos valores dos incrementos, apesar de menos evidente na região da CSN (FIGURA 12b). *A. angustifolia* é uma espécie longeva, tendo sido registradas idades de até 378 anos em Santa Catarina (STEPKA, 2012). Portanto, é possível que a redução nos incrementos observada seja decorrente do efeito negativo da crescente urbanização no município de Araucária a partir da década de 1970, e não pela tendência natural de crescimento da espécie, uma vez que a média de idades das árvores analisadas no presente estudo foi de 58 anos, fase na qual, em geral, não se espera que o crescimento da espécie seja desacelerado.

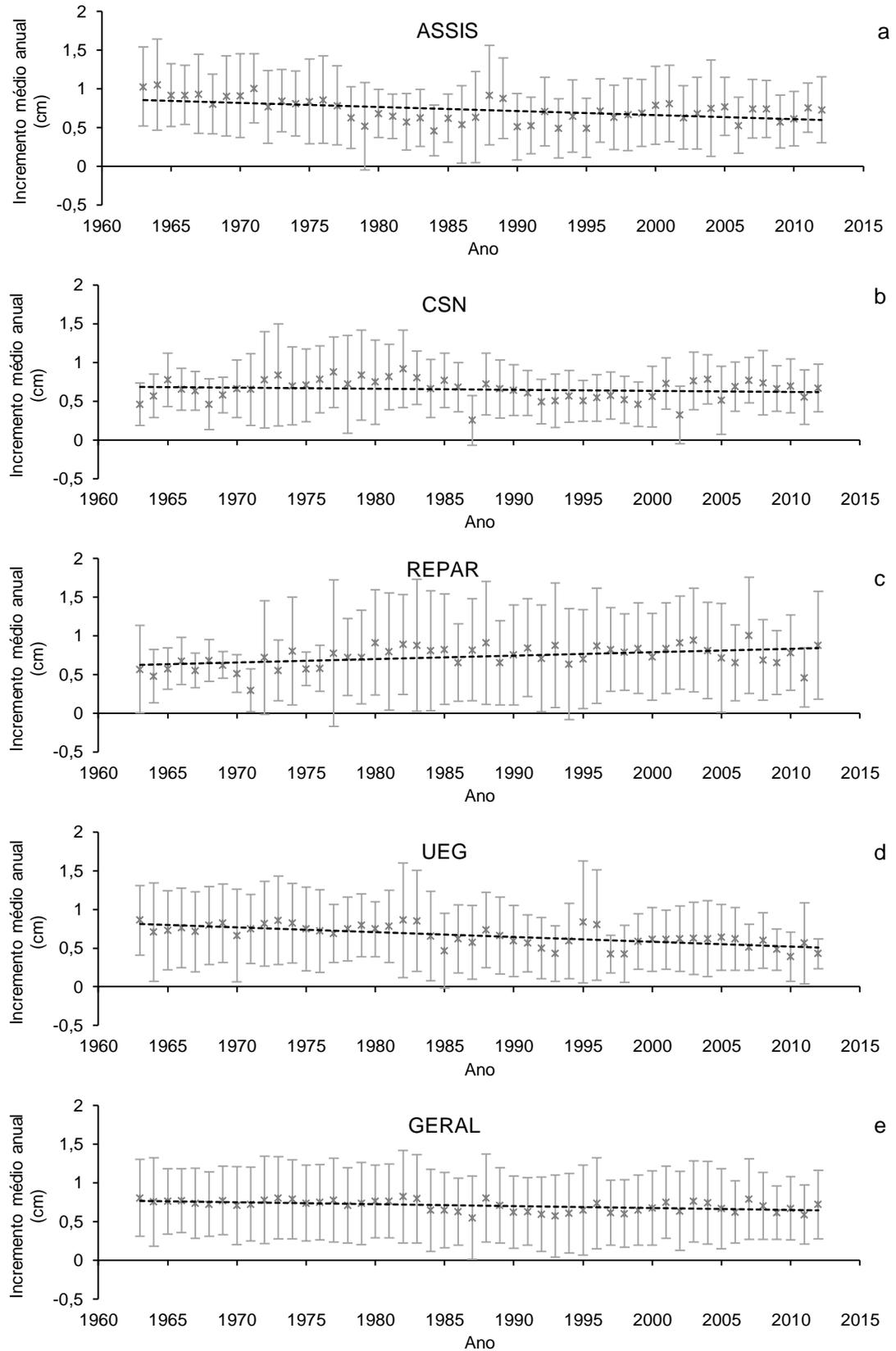


FIGURA 12 - TENDÊNCIAS LINEARES DOS CRESCIMENTOS DIAMÉTRICOS DE *A. angustifolia* MENSURADOS POR LOCAL DE ESTUDO E GERAL
 FONTE: A autora (2015)

Resultados semelhantes foram observados por Musika *et al.* (2004), que registraram diferenças cronológicas em anéis de crescimento, indicando padrões de declínio nos sítios de alta poluição quando comparados àqueles de baixa poluição. Stravinskiene e Erlickyte-Marčiukaitiene (2009) concluíram com resultados do estudo de crescimento de *P. sylvestris* em área industrial, que a intensidade do impacto da poluição no incremento radial das árvores aumenta linearmente com a proximidade à fonte de poluição.

A seleção de um número de parcelas compostas por árvores de idades e características homogêneas em locais urbanos é uma tarefa difícil, pois a área considerada é grande, contando com variedades de espécies de plantas, paisagem, solos, umidade, microclima, movimento de massas de ar e outros parâmetros (ŠIMATONYTĖ; VENCLOVIENĖ, 2009).

Com a diversidade dimensional das árvores amostradas, foi possível comparar, pela estratificação das árvores, espécimes estabelecidos em diferentes épocas no município (FIGURA 13). Percebe-se que, de maneira geral, as árvores de menores dimensões (classe 1) se estabeleceram em meio ao desenvolvimento da industrialização do município, aproximadamente no início da década de 1980. Já as árvores da classe 2 se estabeleceram aproximadamente na década de 1960, 10 anos antes do início do período de industrialização do município, e as árvores da classe 3 na década de 1930.

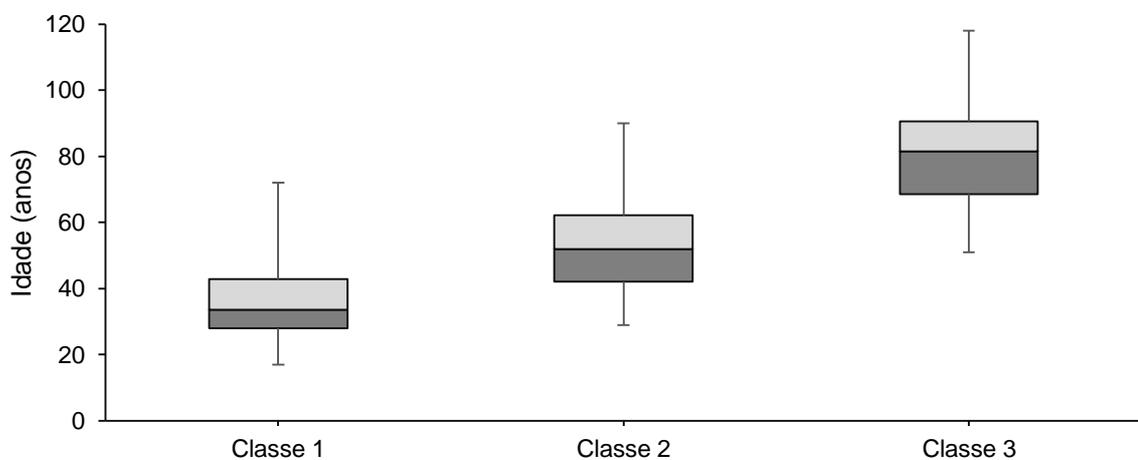


FIGURA 13 - BOX PLOT DA IDADE EM FUNÇÃO DA CLASSE DIAMÉTRICA DAS ÁRVORES DE *A. angustifolia* EM ARAUCÁRIA, PR
 FONTE: A autora (2015)

Dentre os modelos de crescimento testados, optou-se pelo de Gompertz, por apresentar os melhores parâmetros estatísticos (coeficiente de determinação – R^2 , erro padrão da estimativa - S_{yx} e valor de F) e melhor ajuste aos dados mensurados por local. Na TABELA 16 estão apresentados os parâmetros estatísticos das equações ajustadas.

TABELA 16 - PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DO MODELO DE GOMPERTZ DAS ÁRVORES AMOSTRADAS POR CLASSE DIAMÉTRICA E POR LOCAL DE ESTUDO

Classe Diamétrica	Local	R^2_{ajust}	S_{yx} (%)	F
20 – 40 cm	ASSIS	0,997	8,021	914759
	CSN	0,985	19,456	364626
	REPAR	0,980	21,761	291515
	UEG	0,996	9,829	875523
40 – 60 cm	ASSIS	0,996	9,293	1712719
	CSN	0,971	26,604	419095
	REPAR	0,988	6,637	220051
	UEG	0,986	18,180	865055
Acima de 60 cm	ASSIS	0,988	16,368	608687
	CSN	0,988	16,120	266463
	REPAR	0,995	10,076	811608
	UEG	0,990	14,660	1255891

Sendo R^2_{ajust} o coeficiente de determinação ajustado e S_{yx} (%) o erro padrão da estimativa relativo
 FONTE: A autora (2015)

Os parâmetros das equações de crescimento obtidas e seus limites de confiança estão apresentados na TABELA 17. Os limites de confiança dos parâmetros das equações testadas foram diferentes para cada situação, confirmando a necessidade de desenvolvimento de equações de crescimento diferenciadas por classe diamétrica e local de estudo.

TABELA 17 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS PARÂMETROS ESTIMADOS PARA O MODELO DE GOMPERTZ DAS ÁRVORES AMOSTRADAS POR CLASSE DIAMÉTRICA E POR LOCAL DE ESTUDO

Classe Diamétrica	Local	Parâmetros*			Limites de confiança dos parâmetros*					
		β_0^*	β_1^*	β_2^*	β_0^*		β_1^*		β_2^*	
20 – 40 cm	ASSIS	33,55	3,51	0,09	33,48	33,62	3,49	3,52	0,09	0,10
	CSN	34,34	2,39	0,04	34,19	34,48	2,38	2,40	0,04	0,04
	REPAR	29,38	2,53	0,10	29,28	29,48	2,51	2,55	0,10	0,10
	UEG	26,59	2,92	0,09	26,55	26,62	2,90	2,93	0,09	0,09
40 – 60 cm	ASSIS	46,46	2,86	0,06	46,41	46,51	2,85	2,87	0,06	0,06
	CSN	35,03	2,79	0,07	34,96	35,10	2,77	2,81	0,07	0,07
	REPAR	36,82	2,99	0,09	36,63	37,01	2,97	3,02	0,09	0,09
	UEG	43,79	2,78	0,07	43,74	43,85	2,76	2,79	0,07	0,07
Acima de 60 cm	ASSIS	80,73	2,06	0,02	80,16	81,30	2,05	2,07	0,02	0,02
	CSN	52,94	2,26	0,05	52,74	53,13	2,24	2,28	0,05	0,05
	REPAR	82,70	1,74	0,02	82,42	82,97	1,73	1,74	0,02	0,02
	UEG	60,67	2,65	0,05	60,58	60,75	2,64	2,67	0,05	0,05

*Significativos a 95% de probabilidade

FONTE: A autora (2015)

Equações preditivas de crescimento fornecem dados essenciais requeridos para o desenvolvimento da visualização computadorizada do crescimento de árvores nas diversas áreas urbanas. Essa informação auxilia arboristas, paisagistas e gestores de florestas urbanas na execução de planos de arborização dos municípios (PEPER *et al.*, 2001).

As equações de crescimento por classe diamétrica e local de estudo estão apresentadas na FIGURA 14. Os modelos se aplicam à amplitude dos dados mensurados em cada situação.

As árvores de menores dimensões (classe 1) aparentemente responderam negativamente ao ambiente antropizado, tendo apresentado curvas de crescimento inferiores às árvores das outras classes. O fraco desempenho dessas árvores poderia ser associado ao seu estabelecimento pós industrialização do município.

As árvores da classe 2 permaneceram com crescimento intermediário quando comparado ao das classes 1 e 3. Essas árvores se estabeleceram no município aproximadamente na década de 1960 e, quando houve a chegada da industrialização,

em 1970, já tinham cerca de 10 anos de idade, o que provavelmente garantiu um crescimento maior do que as árvores da classe 1 mas não tão acentuado quanto ao das árvores da classe 3.

As árvores de maiores dimensões e também mais velhas sempre tiveram crescimento em destaque com relação ao das outras classes. Essas árvores se estabeleceram antes da chegada da industrialização ao município na década de 1970. Quando a urbanização e a industrialização se intensificaram, as árvores já estavam estabelecidas, com cerca de 40 anos de idade e 35 cm.

O crescimento diamétrico da espécie em condições naturais é ascendente até os 90 cm de diâmetro à altura do peito (DAP), podendo chegar a 2 cm por ano. Depois ocorre tendência de desaceleração, que é mais marcante nas classes diamétricas acima de 110 cm de DAP (MATTOS *et al.*, 2007b).

É possível observar inflexões nas curvas de crescimento das árvores das classes 1 e 2 antes dos 40 anos de idade, evidenciando a antecipação do envelhecimento dessas árvores mais jovens quando em condições de urbanização crescente. As curvas de crescimento das árvores mais velhas apresentam leve inflexão em idades mais avançadas, estabilizando depois das árvores mais jovens. Observa-se inflexão mais acentuada nas curvas de crescimento da classe 3 nos locais de estudo CSN e UEG (FIGURAS 14b e 14d, respectivamente), que são regiões mais urbanizadas, caracterizadas pela proximidade ao centro do município e maior circulação de pessoas. A curva de crescimento das árvores da classe 3 do local de estudo REPAR (FIGURA 14c), sítio com características rurais, é a que tem inflexão mais suave e crescimento superior ao de todos os outros locais. Isso mostra que o seu incremento tem redução mais lenta ao longo do tempo, provavelmente porque os efeitos antrópicos são mais sutis nesse local.

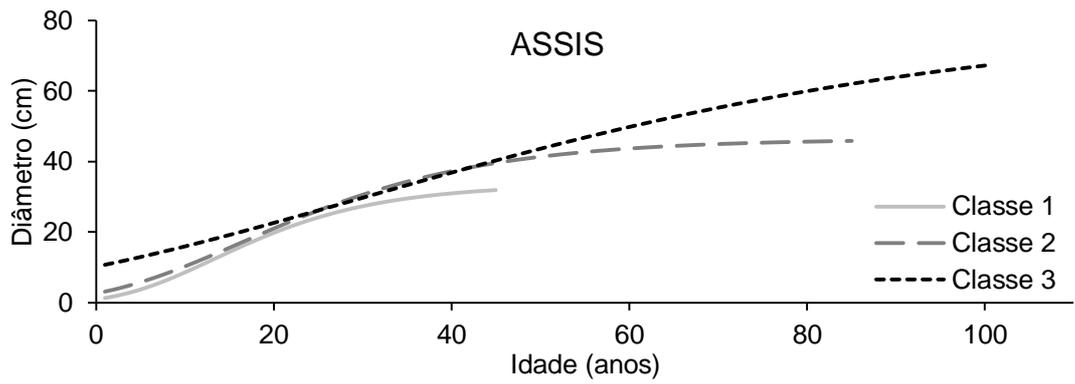
Stepka (2012) registrou o crescimento de *A. angustifolia* em função da idade em diferentes sítios em condição de floresta natural, tendo encontrado inflexão na curva de crescimento, seguida pela redução dos incrementos em diâmetro, a partir dos 80 anos de idade nos sítios de pior qualidade para a espécie e a partir dos 100 anos para os de melhor qualidade. O pesquisador identificou que, em condições favoráveis, a inflexão, resultando na estabilização do crescimento, tende a ser postergada para a mesma espécie nos melhores sítios.

O padrão de crescimento das árvores mais velhas do presente trabalho, comparado ao padrão de crescimento das árvores mais jovens, se assemelha mais

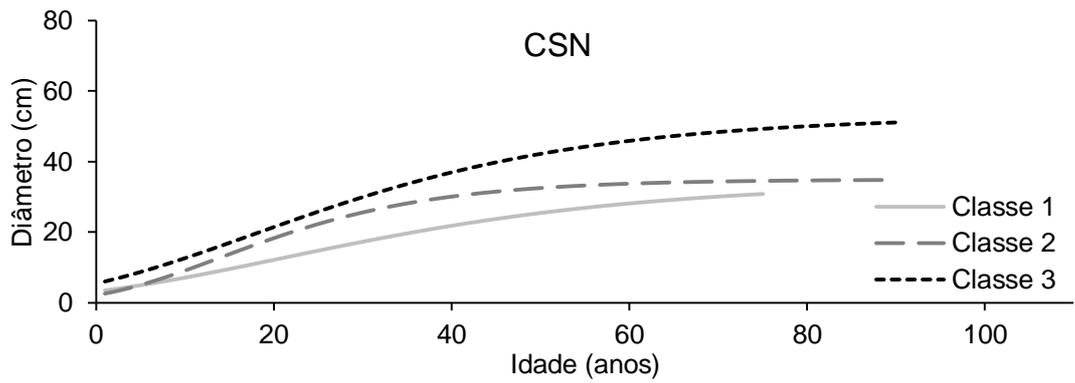
ao crescimento de *A. angustifolia* em condições de floresta natural registrada por Stepka (2012). As árvores jovens das classes 1 e 2 demonstram atingir mais imediatamente a culminação de seu crescimento potencial devido provavelmente ao estresse ambiental.

Com essas observações, sugere-se que o crescimento das árvores de *A. angustifolia* é mais susceptível a impactos da antropização quando as plantas são jovens. Quando as plantas são adultas e a urbanização se instala após sua maturidade, os impactos por elas sofridos são menores. Portanto, as árvores que foram estabelecidas mais recentemente ou ainda irão se estabelecer, necessitarão maiores cuidados para evitar perdas severas de crescimento ou senilidade precoce, principalmente, porque a urbanização e industrialização são condições inerentes à modernidade.

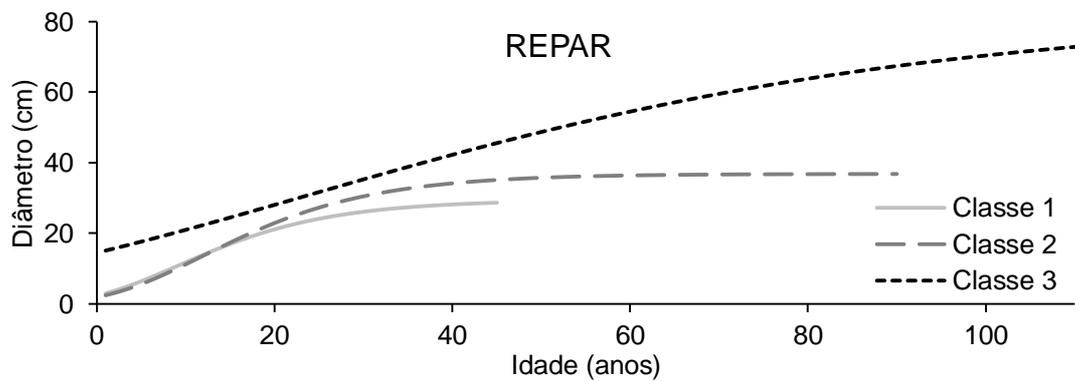
A proximidade às áreas urbanas como causa de redução no crescimento arbóreo já foi registrada por outros autores. Ashby e Fritts (1972), em estudo dendroclimatológico de *Quercus alba* Deam nos Estados Unidos, registraram menores taxas de crescimento para a espécie, que foram associadas à poluição. Segundo os autores, mesmo à grande distância de fontes poluidoras o crescimento das árvores pode ser prejudicado por substâncias tóxicas que inibem a capacidade fotossintética e processos metabólicos. Tal efeito pode ser acumulado ao longo dos anos e causar declínio gradual, porém evidenciado na largura dos anéis de crescimento, enquanto as mudanças anuais de temperatura produziriam variações mais sutis. Os autores também correlacionaram a poluição do ar com o aumento dos índices de neblina, que também podem ter influenciado na redução do crescimento das árvores devido à menor disponibilidade de luz para a realização da fotossíntese.



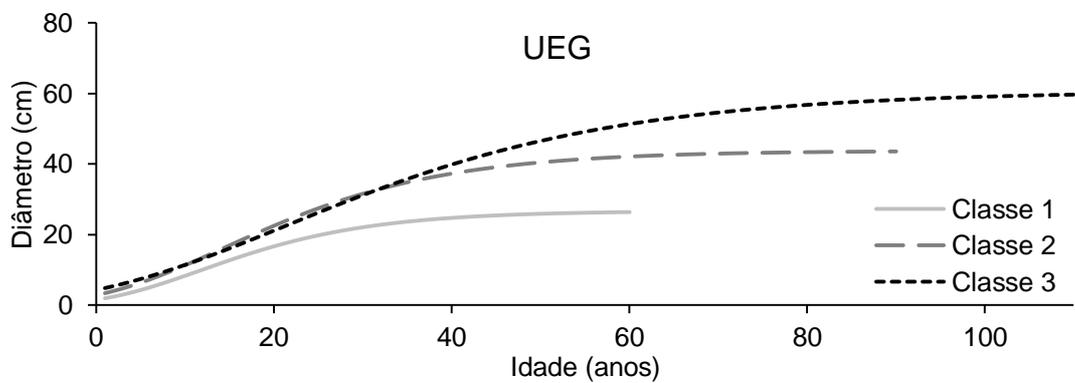
a



b



c



d

FIGURA 14 - MODELOS DE GOMPERTZ ELABORADOS PARA OS LOCAIS DE ESTUDOS POR CLASSES DIAMÉTRICAS. OS PARÂMETROS ESTATÍSTICOS E COEFICIENTES DOS MODELOS SE ENCONTRAM NA TABELA 17
 FONTE: A autora (2015)

O crescimento de árvores de *P. sylvestris* no município de Vilnius, Lituânia, acompanhou a tendência da concentração de poluentes, diminuindo significativamente a partir da década de 1960 e tornando a aumentar a partir de 1996 (ŠIMATONYTĖ; VENCLOVIENĖ, 2009). Os autores sugerem que a dinâmica do incremento radial em área urbana corresponderia à concentração de poluentes acidificantes na atmosfera local. Condições climáticas desfavoráveis ao crescimento enfraqueceram as árvores, que resistiram ainda menos ao aumento da poluição, acentuando o efeito negativo com a redução do incremento em determinados períodos.

Wilczynski (2006), estudando a variação no crescimento anual entre 1990 e 1999 de 8 populações de *P. sylvestris* no sul da Polônia, observou influência climática em curto prazo no crescimento radial durante o período e um decréscimo em longo prazo. Nesses locais em que houve decréscimo gradual de crescimento, esse ocorreu devido a fatores não-climáticos, provavelmente a poluição industrial em maiores níveis.

Quando o objetivo da floresta próxima a locais urbanos ou industriais é econômico, a queda do crescimento diamétrico devido à concentração dos poluentes representa perdas de volume, prejudicando a lucratividade. Ainda que a diminuição do crescimento das árvores seja sutil, é necessário limitar a emissão de poluentes pelas indústrias para evitar perdas econômicas (TOLUNAY, 2003).

Em distrito industrial no sul da Polônia foi registrada redução no crescimento de *P. sylvestris* no período de 1950 a 1990, quando foram observados níveis particularmente altos de emissões de poluentes atmosféricos (MALIK *et al.*, 2012). Houve impacto especialmente negativo no período de 1964 a 1981, quando as árvores da região mais contaminada não apresentaram diversos anéis de crescimento anuais ausentes. Um aumento na mortalidade infantil e morbidade por câncer de pulmão, brônquios e traqueia ocorreu vários anos após o registro da redução dos anéis de crescimento, sugerindo uma defasagem de 6-8 anos dos efeitos tóxicos dos poluentes nos seres humanos com relação aos efeitos no crescimento arbóreo. Portanto, o estudo sugere que é possível a utilização de estudos de anéis de crescimento de árvores como indicadores de futuros efeitos adversos à saúde humana, especialmente naqueles países em que não há monitoramento da qualidade do ar.

5.4 RESPOSTA ÀS VARIÁVEIS AMBIENTAIS

Os incrementos das árvores das classes 1 e 2 foram correlacionados significativamente com SO₂ (correlação positiva) e com NO (correlação negativa), e apresentaram correlação negativa com NO₂, ainda que não significativos (TABELA 18). As árvores da classe 3 provavelmente já estão na fase adulta ou estão próximas à fase senil e não responderam aos estímulos das variáveis testadas.

Pode-se inferir pelos valores de correlações que o SO₂ nas classes diamétricas de menores tamanhos poderiam ter uma relação de adubação com o crescimento da espécie, enquanto os óxidos de nitrogênio não favorecem o crescimento.

TABELA 18 - CORRELAÇÃO DE PEARSON DOS INCREMENTOS POR CLASSE DIAMÉTRICA COM MÉDIAS ANUAIS DE TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Variável	Incrementos		
	Classe 1	Classe 2	Classe 3
SO₂	0,343*	0,333*	0,155
p-valor	0,041	0,047	0,368
NO	-0,476*	-0,375*	-0,076
p-valor	0,003	0,024	0,660
NO₂	-0,291	-0,311	-0,015
p-valor	0,085	0,065	0,931
O₃	-0,018	0,094	-0,038
p-valor	0,916	0,587	0,827
Temperatura	-0,227	-0,099	-0,170
p-valor	0,183	0,567	0,323

*CORRELAÇÕES SIGNIFICATIVAS A 95% DE PROBABILIDADE
 FONTE: A autora (2015)

No Japão, observou-se o estímulo do crescimento de plântulas de espécies florestais submetidas à exposição diária de SO₂ sob diversas condições de adubação com nitrogênio (YAMAGUCHI *et al.*, 2012). Mudanças de *Quercus serrata* Murray, *Fagus crenata* Blume, *Castanopsis sieboldii* (Makino) Hatus. ex T. Yamaz. e Mashiba, *Larix kaempferi* (Lamb.) Carrière e *Pinus densiflora* Siebold e Zucc. apresentaram ganhos de crescimento quando submetidas a baixas concentrações de SO₂, especialmente

sob uma carga relativamente alta de nitrogênio. Entretanto, em experimentos com árvores adultas, diversos autores encontraram relação negativa de SO₂ na atmosfera e incremento arbóreo (BAES; MCLAUGHLIN, 1984; HIRANO; MORIMOTO, 1999; LONG; DAVIS, 1999; MUSIKA *et al.*, 2004).

Kawamura *et al.* (2006) registraram aumento na concentração de enxofre nos anéis de crescimento de árvores de *Cryptomeria japonica* (Thunb. ex L. f.) D. Don de 74 e 54 anos e *Chamaecyparis obtusa* (Siebold & Zucc.) Endl. de 48 anos e no Japão, conforme o decorrer do tempo e a instalação das indústrias petrolíferas no país. Os autores encontraram evidências de que a concentração de enxofre nos anéis de crescimento depende da quantidade do componente emitido na atmosfera.

Os efeitos tóxicos do SO₂ podem não ser aparentes no crescimento arbóreo se as concentrações ocorrerem abaixo do nível tóxico ou serem observados como nutriente complementar se o solo for deficiente em sulfatos solúveis. Além disso, o efeito tóxico depende do tempo de exposição às altas concentrações (KATZ, 1949). As áreas de estudo do autor (KATZ, 1949) foram submetidas a episódios de altas emissões de SO₂, sob condições não controladas, enquanto no município de Araucária, as emissões de SO₂ extrapolaram poucas vezes os limites aceitáveis de acordo com os critérios definidos na legislação brasileira (CONAMA, 1990 e SEMA, 2006). Por esse motivo é possível que a emissão de SO₂ em Araucária pode justificar o efeito inverso tenha favorecido o crescimento das árvores de *A. angustifolia*.

Por outro lado, semelhante ao observado para *A. angustifolia* no presente trabalho, o efeito de NO_x foi negativo no entorno de fábricas de fertilizantes na Lituânia. Nesse local foi verificado um período de adubação por nitrogênio com favorecimento do crescimento de árvores de *P. sylvestris*. Porém, após esse período, que durou de 5 a 8 anos, houve redução nas taxas de incremento causada pelas altas concentrações de óxidos de nitrogênio no ar, conforme verificado por Stravinskiene *et al.* (2013). Os autores mencionam ainda que após controle da poluição ambiental, as taxas de incremento se estabilizaram e não houve redução do crescimento, mesmo com condições climáticas desfavoráveis. Esse é um indicativo de que é possível amenizar os efeitos da poluição no crescimento das árvores de *A. angustifolia* se houver aumento do controle da poluição atmosférica no município de Araucária.

Foi possível quantificar, com modelos de regressão linear múltipla, quanto do incremento anual médio em DAP (cm) para as classes diamétricas 1 e 2 (TABELA 19) é explicado pela concentração média anual dos poluentes ambientais correlacionados

com o crescimento. Para a classe diamétrica 3 não foi possível desenvolver uma equação pois não houve correlação significativa de concentração de nenhum poluente estudado com o crescimento. Com as equações desenvolvidas, foi possível explicar 27,3% e 17,5% do incremento anual médio das classes diamétricas 1 e 2, respectivamente. Esse resultado indica que árvores jovens são mais vulneráveis à poluição ambiental que as mais velhas, nos níveis apresentados no município de Araucária.

Os R^2 foram semelhantes aos encontrados por Rozas (2005) para descrever por modelos lineares múltiplos do crescimento de árvores de *Quercus robur* L. em função de variáveis climáticas mensais no Norte da Espanha, tendo variado de 0,151 a 0,451.

TABELA 19 - MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA DO INCREMENTO DIAMÉTRICO ANUAL EM FUNÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE POLUENTES SIGNIFICATIVAMENTE CORRELACIONADOS

Intervalo de classe de DAP	Modelo de regressão linear múltipla*	R^2_{ajust}	S_{yx} (%)
20 a 40 cm	$IMA (cm) = 0,721 + 0,010[SO_2(ppb)] - 0,013[NO(ppb)]$	0,273	29,1
40 a 60 cm	$IMA (cm) = 0,781 + 0,009[SO_2(ppb)] - 0,010[NO(ppb)]$	0,175	24,4
60 a 80 cm	-	-	-

*significativos a um nível de probabilidade de 99%

Sendo R^2_{ajust} o coeficiente de determinação ajustado e S_{yx} (%) o erro padrão da estimativa relativo

FONTE: A autora (2015)

É importante ressaltar que são inúmeros os fatores que influenciam no crescimento arbóreo além das condições do ar atmosférico, como o sítio, a genética e a idade das plantas e as intervenções silviculturais. Além de serem muitas variáveis a influenciar o crescimento das árvores, o efeito das interações entre elas pode gerar respostas ainda mais intensas do que a soma dos seus efeitos independentes (FRITTS, 1976). Portanto, o estudo da interferência de poluentes e variáveis meteorológicas da atmosfera explica apenas parte do crescimento das árvores, devendo ser considerados os efeitos muitas vezes desconhecidos da interação entre essas variáveis.

Na Lituânia, entre 1990 e 2006, fatores climáticos e concentração de NO₂ e SO₂ descreveram de 66 a 72% a variação de crescimento radial de *P. sylvestris* de 60 a 170 anos em área industrial. Séries de crescimento radial indicaram tendências similares para árvores de diferentes idades, que apresentaram decréscimo significativo desde a década de 1960 e aumento após 1996, quando planos de controle de poluição foram instalados. Nesse caso a precipitação foi o principal fator de influência (ŠIMATONYTĖ; VENCLOVIENĖ, 2009).

Os modelos de regressão linear múltipla, ajustados para o crescimento de *A. angustifolia* no município de Araucária, PR, indicaram que a relação do crescimento arbóreo com as variáveis climáticas e concentração de poluentes do ar dependem da fase do crescimento em que a árvore se encontra e quando ela foi estabelecida. No caso da classe 1, as árvores apresentavam menos de 40 cm de diâmetro e idade média de aproximadamente 30 anos, o que indica que desde seu estabelecimento estiveram submetidas às crescentes concentrações de poluentes gerados pela urbanização e pela industrialização do município. Já as árvores da classe 2, com cerca de 50 anos, se estabeleceram em ambiente menos poluído, o que refletiu em crescimento com menor correlação com os níveis de poluentes ambientais, quando comparadas às árvores da classe 1. As árvores da classe 3 se estabeleceram antes da década de 1970, quando houve o início da transformação do município em polo industrial. Não se percebe pelo ritmo de crescimento que essas árvores tenham sido afetadas, pois em suas fases de estabelecimento o ambiente era menos poluído, tendo possivelmente se estabelecido livres da influência da urbanização.

Šimatonytė e Venclovienė (2009) não observaram relação significativa entre o incremento radial de *P. sylvestris* e a concentração dos poluentes acidificantes com a idade das árvores, que possuíam de 60 a 180 anos. Entretanto, a urbanização e a industrialização no país se intensificaram a partir da década de 1950 (IDZELIS, 1984), o que indica que as árvores estudadas pelos autores são mais velhas do que o período em que houve início da urbanização e industrialização, e que suas fases juvenis foram menos influenciadas pela contaminação de poluentes industriais, como é o caso das árvores no presente trabalho.

Considerando uma situação hipotética em que foram simuladas as taxas de ganhos e perdas em incremento de *A. angustifolia* no município aplicando as equações lineares múltiplas ajustadas para as duas classes, foi possível simular as taxas de ganhos e perdas em incremento de *A. angustifolia* no município se não

houver interferência de outras variáveis e não ocorram modificações nas concentrações dos dois poluentes que interferem no crescimento da espécie (para as classes diamétricas que sofrem interferência desses poluentes). Se houver acréscimo de 1% ao ano nas concentrações de SO₂ e NO na atmosfera, estima-se que as árvores de 20 a 40 cm de diâmetro terão uma perda de 6% no incremento anual ao final de 30 anos, enquanto as de 40 a 60 cm perderão por volta de 2,7% da taxa de crescimento. Da mesma forma, caso sejam tomadas medidas de controle nas emissões, e a cada ano seja reduzido 1% a concentração dos poluentes, as árvores de 20 a 40 cm de diâmetro terão um ganho de 5,2% e as de 40 a 60 cm de 2,5% ao final de 30 anos. No entanto, é importante lembrar que o crescimento é um processo complexo da resposta da interação de muitas variáveis, sendo esse exercício apenas usado para mostrar possíveis causas de alteração no crescimento futuro das árvores com a alteração desses componentes.

Šimatonytė e Vencloviėnė (2009) determinaram, através da correlação entre a concentração de SO₂ e NO₂ com o incremento radial de *P. sylvestris* em parques urbanos na Lituânia, que a redução da concentração desses gases poderia ser fator determinante para o aumento no crescimento radial da espécie. Pela prognose calculada pelos autores através de modelos de regressão múltipla, foi constatado que um aumento de poucos microgramas na concentração de SO₂ e NO₂ na área de estudo poderia determinar decréscimos significativos no incremento radial de *P. sylvestris*.

Em pesquisa desenvolvida na Eslováquia, árvores dominantes de *Abies alba* Mill. foram amostradas em 4 áreas de estudo. Dois fatores principais foram relacionados ao aumento das taxas de crescimento dos abetos na região: mudanças climáticas recentes e reduções nas concentrações de SO₂ e NO_x (óxidos de nitrogênio) atmosféricos, desde os anos 1980 e 1990. Os resultados desse estudo sugerem que uma rápida diminuição das concentrações de nitrogênio e SO₂ favorece a recuperação da taxa de crescimento de árvores (BOŠEĽA *et al.*, 2014).

A. angustifolia ser mostrou ser indicada para plantio em áreas antropizadas, pois é uma espécie longeva que pode resistir às injúrias geradas pela poluição a níveis controlados, sendo seu crescimento pouco prejudicado. Trabalhos que visem o entendimento da captação de poluentes pela espécie são necessários para se conhecer seu potencial mitigador da poluição urbana.

6 CONCLUSÕES

No período de 2005 a 2012 houve decréscimo de 10,7% na área de florestas no perímetro urbano do município de Araucária, PR, sendo que, enquanto houve a supressão de 555 hectares de florestas, apenas 335 hectares foram adicionados. As zonas residencial e industrial são maiores em extensão e foram as que mais apresentaram perda de vegetação arbórea.

A concentração dos principais poluentes do ar no período de 2003 a 2013 permaneceu dentro dos limites máximos estipulados pela legislação brasileira (RESOLUÇÃO CONAMA N°03/90, SEMA N° 054/06).

A qualidade do ar foi distinta em cada região do município no entorno de cada estação automática de monitoramento da qualidade do ar, utilizando parâmetros médios anuais das concentrações de NO_x, CO, SO₂, O₃, partículas totais suspensas (PTS) e partículas inaláveis (PI).

Foram detectados, ao longo do dia, três padrões de períodos críticos de concentração dos poluentes no ar, consistentes com relatos de maior emissão ou menor dispersão, de acordo com as características de cada poluente estudado. Por esse motivo, cada grupo de poluentes deve ser monitorado e controlado de forma específica.

O inverno é o período do ano em que os poluentes são mais concentrados na troposfera, uma vez que o ar frio mantém as partículas de poluentes adensados sobre as cidades. Por isso, esse período deve receber especial atenção quanto aos efeitos negativos da poluição atmosférica.

A. angustifolia mostrou indicativos de sofrer interferência da poluição em seu crescimento, mesmo em condições controladas de concentração de poluentes atmosféricos. Notaram-se diferentes intensidades de interferência, de acordo com a idade das árvores e do período em que se estabeleceram no município.

As menores árvores, que estiveram submetidas a maiores níveis de poluição desde a fase jovem, foram as que responderam de forma mais negativa, tendo apresentado curva inferiores de crescimento. Além disso, observou-se para as árvores de 20 a 60 cm de DAP indicativo de envelhecimento precoce. Esses efeitos no crescimento das árvores podem ser atribuídos às condições do meio em que estão inseridas, em que são diversos os fatores antrópicos e de poluição do ar que podem

exercer influência nas atividades fisiológicas vegetais. Isso foi evidenciado quando comparado o crescimento das árvores da região de estudo REPAR, localizada em local com características rurais, onde o crescimento foi semelhante ao encontrado em florestas naturais por outros autores.

A correlação do crescimento de *A. angustifolia* com a concentração média anual dos poluentes também foi associado à idade das árvores, sendo as árvores mais jovens as que foram mais afetadas. Foram encontradas correlações significativas com SO₂ e NO, sendo elas mais fortes para a classe 1, de 20 a 40 cm de DAP, e mais fracas para a classe 2, de 40 a cm de DAP. O crescimento das árvores de maiores dimensões (maior que 60 cm de DAP) não foi correlacionado significativamente com nenhuma variável testada.

Com a concentração média anual de SO₂ e NO foi possível explicar 27,3% do crescimento das árvores da classe 1 e 17,5% das árvores da classe 2. Esses valores sugeriram que a concentração de poluentes exerce influência sobre o crescimento das árvores.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A arborização urbana abrange o planejamento em longo prazo, a coordenação profissional e a participação local. As pesquisas e desenvolvimentos nessa área são executados principalmente por países desenvolvidos, como os Estados Unidos. Nos países em desenvolvimento, como o Brasil, são necessárias ações mais concretas para o uso de técnicas adequadas que visem o estabelecimento da arborização urbana com objetivo de obter os diversos benefícios que dela advêm (KÜCHELMEISTER, 2000). Essas ações deveriam ser monitoradas, para embasamento de situações semelhantes entre municípios, otimizando assim tempo e recursos humanos e financeiros.

Pode haver contribuição da prefeitura no sentido de priorizar o entendimento sobre o desenvolvimento das florestas urbanas, com repasse do material lenhoso que é derrubado na cidade, para centros de pesquisa e universidades que trabalhem conjuntamente para gerar protocolos de manejo das florestas e árvores urbanas.

O município de Araucária, PR, além de apresentar alto grau de crescimento populacional, tem um agravante para a poluição do ar atmosférico, que é a intensa industrialização iniciada a partir de incentivos governamentais na década de 1970. Portanto, atenção especial deve ser dada no sentido de conservação e reposição da área florestal no perímetro urbano, com objetivo de mitigar efeitos provenientes da poluição do ar. Semelhante a muitas cidades, a urbanização no município de Araucária avança sobre maciços florestais, sendo necessária por parte das unidades administrativas a implantação de planos de desenvolvimento com a reserva de áreas verdes de florestas naturais e implantação de árvores e florestas.

O custo associado à implantação da vegetação, especialmente em áreas industriais, é relativamente baixo. Como há pouco espaço para o plantio, um número pequeno de mudas necessita ser adquirido para povoar um grande espaço. O plantio de árvores poderia ser focado inicialmente em ruas mais movimentadas, como estratégia para a divulgação e adesão da população e opinião pública. Os plantios bem sucedidos tendem a alcançar apoio da população na continuidade do programa de arborização urbana (PORACSKY, 1999).

A arborização urbana não é, entretanto, domínio exclusivo do setor público, havendo diversas parcerias público-privadas inovadoras. Financiamentos de

programas de arborização urbana devem surgir de uma mistura criativa de fontes públicas e privadas (KÜCHELMEISTER, 2000).

As espécies devem ser diversificadas na arborização urbana e sua escolha depende de características do sítio. Mesmo em áreas com limitações especiais, como é o caso do município de Araucária, que em grande parte é de zonas industriais, há possibilidade de inserção de espécies muito mais variadas do que as já implantadas. Quanto maior a diversidade, maior o interesse visual que as árvores fornecem, além de garantir taxas mais elevadas de sobrevivência por evitar pragas e doenças específicas para uma única espécie (PORACSKY, 1999). O entendimento da dinâmica das espécies é necessário para a escolha daquelas que melhor respondem à poluição como filtros do ar, e resistentes às diversas injúrias comuns em ambiente urbano.

O plantio de um grande número de árvores em um curto período de tempo cria o estabelecimento de povoamentos homogêneos, de mesma idade, o que tende a unificar o período de mortalidade das árvores. Como o objetivo das florestas urbanas não é a colheita da madeira, plantios homogêneos não são interessantes, pois se todas as árvores completarem o ciclo em um mesmo período, em um determinado momento o déficit de cobertura arbórea será muito grande, o que pode ser um problema para os gestores das áreas verdes (PORACSKY, 1999). Assim, sugere-se que a implantação de árvores no município de Araucária seja feita de forma gradual e planejada.

Atenção especial deve ser direcionada à manutenção das árvores quando implantadas no município. A mais séria preocupação na floresta urbana é a morte prematura de árvores individuais, devido a fatores ambientais, danos humanos, ou remoção intencional. É necessária uma proteção física especial às árvores recém-plantadas. Em muitos casos, considera-se a implantação de barreiras físicas, como cercas ou grades, ou sinalizadores como bandeiras em torno da árvore, para aumentar a visibilidade e chamar atenção da população para evitar que elas sejam danificadas. Esses cuidados são necessários durante o estabelecimento inicial das árvores plantadas em zonas urbanas e industriais (PORACSKY, 1999).

O ambiente e os seres humanos interagem com os padrões e formas de vegetação na cidade. Os gestores das florestas urbanas podem alterar determinados padrões de atitudes indesejadas através de educação, incentivos fiscais e determinações legais para proteção das áreas verdes das cidades (NOWAK, 1996).

REFERÊNCIAS

- ASHBY, W. C.; FRITTS, H. C. Tree growth, air pollution, and climate near LaPorte, Ind. **Bulletin American Meteorological Society**, v. 53, n. 3, 1972.
- AYLOR, D. E. **Some physical and. psychological aspects of noise attenuation by vegetation**. In: Conference on Metropolitan Physical Environment, Syracuse. Proceedings, USDA Forest Service General Technical Report, n. 25, 1977.
- BAES III, C. F.; McLAUGHLIN, S. B. Trace elements in tree rings: evidence of recent and historical air pollution. **Science**, v. 224, p. 494-497, 1984.
- BARTENS, J.; GRISSINO-MAYER, H. D.; DAY, S. D.; WISEMAN, P. E. Evaluating the potential for dendrochronological analysis of live oak (*Quercus virginiana* Mill.) from the urban and rural environment — An explorative study. **Dendrochronologia**, v. 30, n. 1, p. 15-21, 2012.
- BOŠEĽA, M.; PETRÁŠ, R.; SITKOVÁ, Z.; PRIWITZER, T.; PAJTÍK, J.; HLAVATÁ, H.; TOBIN, B. Possible causes of the recent rapid increase in the radial increment of silver fir in the Western Carpathians. **Environmental Pollution**, v. 184, p. 211-221, 2014.
- BRACK, C. L. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. **Environmental pollution**, v. 116, p. 195-200, 2002.
- BRIENEN, R. **Tree rings in the tropics: A study on growth and ages of Bolivian rain forest trees**. Programa Manejo de Bosques de la Amazonía Boliviana (PROMAB), Scientific Series 10. Riberalta, Bolivia, 2005.
- BRUNEKREEF, B.; HOLGATE S. T. Air pollution and health. **The lancet**, v. 340, p. 1233-1242, 2002.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Springer Science & Business Media, 2012.
- BUSSOTTI, F.; FERRETTI, M. Air pollution, forest condition and forest decline in Southern Europa: An overview. **Environmental Pollution**, v. 101, n. 1, p. 49-65, 1998.
- CAIN, W. F. Carbon-14, tree rings, and urban air pollution. **Environment International**, v. 1, p. 167-171, 1978.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, v. 1, 2003. 1039 p.
- CHAGAS, M. P. **Anéis de crescimento do lenho de árvores como monitores ambientais: avaliação temporal e espacial da poluição atmosférica na cidade de Paulínia, São Paulo**. 180 f. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

CHEREMISINOFF, Nicholas P. **Handbook of air pollution prevention and control**. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2002.

CLEVENGER, J. F. **The effect of the soot in smoke on vegetation**. Mellon Institute of Industrial Research and School Specific Industries, University Pittsburgh, 1913. 26p.

CONAMA. Resolução nº 003, de 28 de junho de 1990. Dispõe Sobre Padrões de Qualidade do Ar, Previstos no Pronar. BRASIL. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res90/res0390.html>>. Acesso em: 28 de agosto de 2014.

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

DANNI-OLIVEIRA, I. M. Poluição do ar como causa de morbidade e mortalidade da população urbana. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 15, n. 1, 2008.

DAVISON, A. C.; HINKLEY, D. V. **Bootstrap methods and their application**. Cambridge series in statistical and probabilistic mathematics. Cambridge University Press. Cambridge, 1997. 582p.

EMBRAPA MONITORAMENTO POR SATÉLITE. **Satélites de Monitoramento**. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2013. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 7 de junho de 2014.

EURICH, Z. R. dos S.; CARNEIRO, D. C.; MALISKI, F. L.; GONÇALVES, N. G. T.; CARVALHO, S. M. ANÁLISE DA ARBORIZAÇÃO URBANA DA ÁREA CENTRAL DE PONTA GROSSA-PR. **Revista Perspectiva Geográfica**, v. 9, n. 10, 2014.

EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL. **Diretiva 2008/50/CE do Parlamento e Conselho Europeus, de 21 de Maio de 2008, relativa à qualidade do ar ambiente e a um ar mais limpo na Europa**. Disponível em: <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:0044:PT:PDF>>, acesso em 30 de janeiro de 2015.

FERNANDES, C. C. **Padrão de Atividade, Dieta e Uso do Espaço por *Callicebus personatus* (Primates, Pitheciidae) em uma Área de Parque Urbano, Município de Santa Teresa, ES**. Dissertação (Mestrado). 35f. Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, 2013.

FLAGAN, R. C.; SEINFELD, J. H. **Fundamentals of air pollution engineering**. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ, 1988.

FRITTS, H. C. **Tree rings and climate**. London: Academic Press, 1976.

GARBE-SCHÖNBERG, C.-D.; REIMANN, C.; PAVLOV, V. A. 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**, v. 32, n. 1, p. 9-16, 1997.

GERALDO, S. M.; CANTERAS, F. B.; MOREIRA, S. Biomonitoring of environmental pollution using growth tree rings of *Tipuana tipu*: Quantification by synchrotron radiation total reflection X-ray fluorescence. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 95, p. 346-348, 2014.

HAAS, P. M. Do regimes matter? Epistemic communities and Mediterranean pollution control. **International Organization**, 43, p. 377-403, 1989.

HÄTTENSCHWILER, S. MIGLIETTA, F. RASCHI, A.; KÖRNER, C. Thirty years of in situ tree growth under elevated CO₂: a model for future forest responses? **Global Change Biology**, v. 3, p. 463-471, 1997.

HESS, A. F.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Crescimento em diâmetro de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em função da idade, em três regiões do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 1, p. 7-22, 2009.

HIRANO, T.; MORIMOTO, K. Growth reduction of the Japanese black pine corresponding to an air pollution episode. **Environmental pollution**, v. 106, n. 1, p. 5-12, 1999.

HORLER, D. N. H. *et al.* Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content. **Advances in Space Research**, v. 3, n. 2, p. 273-277, 1983.

IAP. Instituto ambiental do Paraná. **Lista oficial de espécies da flora ameaçadas de extinção no Paraná**. Procedimento Operacional Padrão N° 5 de 20 de junho de 2008.

IAP. **Monitoramento da qualidade do ar**. Disponível em: <<http://www.iap.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=639>>. Acesso em 30 de setembro de 2012.

IAP. **Relatório da Qualidade do Ar na Região Metropolitana de Curitiba, 2011**. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Monitoramento/Rel_Anuar_2011_Qualidade_Ar_V7_IAP.pdf>. Acesso em 30 de setembro de 2012.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 28 de agosto de 2014.

IDZELIS, A. Industrialization and population change in the Baltic republics. **Lithuanian Quarterly Journal Of Arts And Sciences**, v. 30, n. 2, 1984.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice hall, 1992. 773p.

JUKNYS, R.; STRAVINSKIENE, V.; VENCLOVIENE, J. Tree-ring analysis for the assessment of anthropogenic changes and trends. **Environmental monitoring and assessment**, v. 77, n. 1, p. 81-97, 2002.

KAMPA, M.; CASTANAS E. Human health effects of air pollution. **Environmental Pollution**, v. 151, n. 2, p. 362-367, 2008.

KATZ, M. Sulfur Dioxide in Atmosphere and Its Relation to Plant Life. **Industrial e Engineering Chemistry**, v. 41, n. 11, p. 2450-2465, 1949.

KAWAMURA, H.; MATSUOKA, N.; MOMOSHIMA, N.; KOIKE, M.; TAKASHIMA, Y. Isotopic evidence in tree rings for historical changes in atmospheric sulfur sources. **Environmental science & technology**, v. 40, n. 18, p. 5750-5754, 2006.

KLUMPP, A.; ANSEL, W.; KLUMPP, G.; FOMIN, A. Um novo conceito de monitoramento e comunicação ambiental: a rede europeia para a avaliação da qualidade do ar usando plantas bioindicadoras (EuroBionet). **Revista Brasileira de Botânica**, v. 24, n. 4, p. 511-518, 2001.

KONIJNENDIJK C. C.; NIELSEN A. B.; SCHIPPERIJN J.; ROSENBLAD Y.; SANDER H.; SARV M.; MAKINEN K; TRYVAINEN K.; DONIS J.; GUNDERSEN V.; AKERLUND U.; GUSTAVSSON R. Assessment of urban forestry research and research needs in Nordic and Baltic countries. **Urban Forestry e Urban Greening**, v. 6, n. 4, p. 297-309, 2007.

KOZLOWSKI, T. T.; PALLARDY, S. G. **Physiology of woody plants**. 2nd. ed. San Diego : Academic Press, 1997. 411p.

KÜCHELMEISTER, G. Trees for the urban millennium: urban forestry update. **Unasylva 200**, v. 51, p. 49-55, 2000.

LEGGE, A. H.; JAQUES, D. R.; AMUNDSON, R. G.; WALKER, R. B. Field studies on pine spruce and aspen periodically subjected to sulfur gas emissions. **Water Air and Soil Pollution**, v. 8, n. 1, p. 105-129, 1977.

LIMA, W. P. As florestas e a poluição do ar. **IPEF Serie Técnica**, n. 1, 1980. 41p.

LONG, R. P.; DAVIS, D. D. Growth variation of white oak subjected to historic levels of fluctuating air pollution. **Environmental pollution**, v. 106, n. 2, p. 193-202, 1999.

MAGE, D.; OZOLINS, G.; PETERSON, P.; WEBSTER, A.; ORTHOFERJ, R.; VANDEWEERDS, V.; GWYNNET. Urban air pollution in megacities of the world. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 5, p. 681-686, 1996.

MALIK, I.; DANEK, M.; MARCHWINSKA-WYRWAL, E.; DANEK, T.; WISTUBA, M.; MAREK, K. Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) Growth Suppression and Adverse Effects on Human Health Due to Air Pollution in the Upper Silesian Industrial District (USID), Southern Poland. **Water Air Soil Pollut**, v. 223, p. 3345–3364, 2012.

MATTOS, P. P. de; OLIVEIRA, M. F.; AGUSTINI, A. F.; BRAZ, E. M.; RIVERA, H.; OLIVEIRA, Y. M. M. de; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZU, M. C. Aceleração do crescimento em diâmetro de espécies da Floresta Ombrófila Mista nos últimos 90 anos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 64, p. 319-326, nov./dez. 2010.

MATTOS, P. P. de; SANTOS, A. T. dos; OLIVEIRA, Y. M. M. de; ROSOT, M. A. D. Dendrocronologia de espécies da Floresta Ombrófila Mista do Município de Candói, PR. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 54, p. 153-156, jan./jun. 2007a. Nota Científica.

- MATTOS, P. P. de; SANTOS, A. T. dos; RIVERA, H.; OLIVEIRA, Y. M. M.; ROSOT, M. A. D.; GARRASTAZU, M. C. Crescimento de *Araucaria angustifolia* na Reserva Florestal Embrapa/Epagri, Caçador, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 55, p. 107-114, 2007b. Nota científica.
- MATTOS, P. P.; BRAZ, E. M., DOMENE, V. D.; SAMPAIO, E. V. D. S. B.; GASSON, P.; PAREYN, F. G. C.; ALVAREZ, I. A.; BARACAT, A.; ARAÚJO, E. D. L. Climate-tree growth relationships of *Mimosa tenuiflora* in seasonally dry tropical forest, Brazil. **Cerne**, v. 21, n. 1, p. 141-149, 2015.
- MAYER, H. Air pollution in cities. **Atmospheric environment**, v. 33, n. 24, p. 4029-4037, 1999.
- MCLAUGHLIN, S. B. Effects of air pollution on forests – A critical review. **Journal of the Air Pollution Control Association**, v. 35, n. 5, p. 512-534, 1985.
- MCLAUGHLIN, S. B.; BRÄKER, O. U. Methods for evaluating and predicting forest growth responses to air pollution. **Experientia**, v. 41, n. 3, p. 310-319, 1985.
- MCLAUGHLIN, S. B.; MCCONATHY, R. K.; DUVICK, D.; MANN, L. K. Effects of chronic air pollution stress on photosynthesis, carbon allocation, and growth of white pine trees. **Forest Science**, v. 28, n. 1, p. 60-70, 1982.
- MCLAUGHLIN, S. B.; PERCY, K. Forest health in North America: some perspectives on actual and potential roles of climate and air pollution. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 116, n. 1-2, p. 151-197, 1999.
- MCLAUGHLIN, S. B.; SHORTLE, W. C.; SMITH, K. T. Dendroecological applications in air pollution and environmental chemistry: research needs. **Dendrochronologia**, v. 20, n. 1, p. 133-157, 2002.
- MCPHERSON, E. G.; SIMPSON, J. R. Carbon Dioxide Reduction Through Urban Forestry. **General Technical Report, PSW-171, USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station, Albany, CA**, 1999.
- MEDING, B. Epidemiology of hand eczema in an industrial city. **Acta dermatovenereologica. Supplementum**, v. 153, p. 1-43, 1989.
- MENDENHALL, W. **Introduction to probability and statistics**. 3.ed. Belmont, California: Duxbury Press, 1971.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Lista Oficial das Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção**. Instrução Normativa nº 6 de 23 de setembro de 2008. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/ascom_boletins/_arquivos/83_19092008034949.pdf>. Acesso em: 28 de agosto de 2014.
- MUDD, J. B., KOSLOWSKI, T. T. **Responses of plants to air pollution**. Academic Press, New York, 1975. 328p.

- MURPHY JR, C. E.; SINCLAIR, T. R.; KNOERR, K. R. A model for estimating air-pollutant uptake by forests: calculation of absorption of sulfur dioxide from dispersed sources. **Proceedings of the Conference on Metropolitan Physical Environment**, p. 340-350, 1977.
- MUZIKA, R. M.; GUYETTEA, R. P.; ZIENLONKAB, T.; LIEBHOLD, A. M. The influence of O₃, NO₂ and SO₂ on growth of *Picea abies* and *Fagus sylvatica* in the Carpathian Mountains. **Environmental Pollution**, v. 130, n. 1, p. 65-71, 2004.
- MYEONG, S.; NOWAK, D. J.; HOPKINS, P. F.; BROCK, R. H. Urban cover mapping using digital, high-spatial resolution aerial imagery. **Urban Ecosystems**, v. 5, n. 4, p. 243-256, 2001.
- MYINT, S. W.; GOBER, P.; BRAZEL, A.; GROSSMAN-CLARKE, S.; WENG, Q. Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery. **Remote sensing of environment**, v. 115, n. 5, p. 1145-1161, 2011.
- NAGI, R. Classifying Landsat image services to make a land cover map. **ArcGIS Resources**, Esri, 2014. Disponível em: <<http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2011/05/28/classifying-landsat-image-services-to-make-a-land-cover-map/>>. Acesso em 25 de abril de 2015.
- NASCIMENTO, R. G. M. do; MACHADO, S. do A.; FIGUEIREDO, D. J.; AUGUSTYNCZIK, A. L. D.; CAVALHEIRO, R. Relações dendrométricas de *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 369, 2010.
- NEGRELLI, M. J. **O papel do estado e das indústrias na produção do espaço e da qualidade de vida no município de Araucária/PR**. 2004. Dissertação (Mestrado em Geografia). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- NIMIS, P. L.; LAZZARIN, G.; LAZZARIN, A.; SKERT, N. Biomonitoring of trace elements with lichens in Veneto (NE Italy). **Science of the total environment**, v. 255, n. 1, p. 97-111, 2000.
- NOWAK, D. J. Atmospheric carbon reduction by urban trees. **Journal of Environmental Management**, v. 37, p. 207-217, 1993.
- NOWAK, D. J.; CRANE, D. E.; STEVENS, J. C. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. **Urban forestry e urban greening**, v. 4, n. 3, p. 115-123, 2006.
- NOWAK, D. J.; MCHALE, P. J.; IBARRA, M.; CRANE, D.; STEVENS, J. C.; LULLEY, C. J. **Modeling the effects of urban vegetation on air pollution**. Air Pollution Modelling and Its Application XII, 1998. Em: Air pollution modeling and its application XII. Nova Iorque; Plenum Press: p. 399-407, 1998.
- NOWAK, D. J.; ROWNTREE, R. A.; MCPHERSON, E. G.; SISINNIA, S. M.; KERKMANN, E. R.; STEVENSA, J. C. Measuring and analyzing urban tree cover. **Landscape and Urban Planning**, v. 36, n. 1, p. 49-57, 1996.

OLIVEIRA, J. M.; PILLAR, V. D.; ROIG, F. A. Padrões de idade e crescimento de *Araucária angustifolia*: reconstruindo históricos de distúrbio e dinâmica vegetacional. In: **Anais do VIII Congresso de Ecologia do Brasil**. Caxambu – MG, 2007. p. 1-2.

PARANÁ. PREFEITURA MUNICIPAL DE ARAUCÁRIA. **Lei Municipal**, nº 2660, de 26 de outubro de 2010. Plano de Zoneamento Urbano, Uso e Ocupação do Solo. Araucária, 2010. Disponível em: <<https://www.leismunicipais.com.br/plano-de-zoneamento-uso-e-ocupacao-do-solo-araucaria-pr>>. Acesso em 30 de setembro de 2012.

PARANÁ. PREFEITURA MUNICIPAL DE ARAUCÁRIA. Dados Gerais. Disponível em: <<http://www.araucaria.pr.gov.br/pma/araucaria/dados-gerais/>>. Acesso em: 27 de abril de 2015.

PEPER, P. J.; MCPHERSON, E. G.; MORI, S. M. Equations for predicting diameter, height, crown width, and leaf area of San Joaquin Valley street trees. **Journal of Arboriculture**, v. 27, n. 6, p. 306-317, 2001.

PEREIRA FILHO, A. J., DOS SANTOS, P. M., DE CAMARGO, R., FESTA, M., FUNARI, F. L., SALUM, S. T.; FIALHO, W. G. M. A. Impactos antrópicos no clima da Região Metropolitana de São Paulo. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 48-56, 2007.

POLGE, H. The use of x-ray densitometric methods in dendrochronology. **Tree-Ring Bulletin**, v. 30, n 1-4, p. 1-10, 1970.

POPE III, C. A. Respiratory disease associated with community air pollution and a steel mill, Utah Valley. **American Journal of Public Health**, v. 79, n. 5, p. 623-628, 1989.

PORACKSY, J.; SCOTT, M. Industrial-area street trees in Portland, Oregon. **Journal of Arboriculture**, v. 1, n. 1, p. 9-17, 1999.

POTCHTER, O.; ITZHAK BEN-SHALOM, H. Urban warming and global warming: Combined effect on thermal discomfort in the desert city of Beer Sheva, Israel. **Journal of Arid Environments**, v. 98, p. 113-122, 2013.

RECIO, J. A.; HELMHOLZ, P.; MÜLLER, S. Potential Evaluation of Different Types of Images and their Combination for the Classification of GIS Objects Cropland and Grassland. International Archives of the Photogrammetry, **Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, p. 4, 2011.

RINN, F. TSAP V3.6: **Reference Manual: Computer Program for Tree-Ring Analysis and Presentation**. RINNTECH, Heidelberg: Dipl.-Phys., 1996.

RODRIGUES, A. L.; CINTRA, A.; MAGALHÃES, M. V.; MOURA, R. **O Estado do Paraná no Censo 2010**. 2013. Disponível em: <http://observatoriodasmetropoles.net/download/PR_Censo2011.pdf>. Acesso em 03 de novembro de 2014.

ROMANINI, A.; MELO, E. F. R. Q. Levantamento do potencial arbóreo em um núcleo habitacional de baixa renda na cidade de Passo Fundo/RS. In: V Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis. **Anais**. Recife, 2009.

ROZAS, V. Dendrochronology of pedunculate oak (*Quercus robur* L.) in an old-growth pollarded woodland in northern Spain: tree-ring growth responses to climate. **Annals of Forest Science**, v. 62, n. 3, p. 209-218, 2005.

SANTAROSA, E.; OLIVEIRA, J. M. de; ROIG, F. A.; PILLAR, V. D. Crescimento Sazonal em *Araucaria angustifolia*: Evidências Anatômicas. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. S1, p. pg. 618-620, 2007.

SANTOS, R. M. dos; SIMAS, N. G.; FERREIRA, J. L.; SANTOS, J. dos R.; MARQUES NETO, R. Arborização urbana em Caxambu (MG) e suas relações com a qualidade ambiental. In: VIII Congresso de Ecologia do Brasil, 2007, Caxambu MG. Ecologia no Tempo de Mudanças Globais. **Anais**. 2007.

SCHUSTER, C.; FÖRSTER, M.; KLEINSCHMIT, B. Testing the red edge channel for improving land-use classifications based on high-resolution multi-spectral satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 33, n. 17, p. 5583-5599, 2012.

SEFTIGEN, K.; MOLDAN, F.; LINDERHOLM, H. W. Radial growth of Norway spruce and Scots pine: effects of nitrogen deposition experiments. **European Journal of Forest Research**, v. 132, n. 1, p. 83-92, 2013.

SEINFELD, John H.; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. John Wiley e Sons, 2012.

SEITZ, R. A.; KANNINEN, M. Tree ring analysis of *Araucaria angustifolia* in Southern Brazil: preliminary results. **IAWA Bulletin**, v. 10, n. 2, p. 170-174, 1989.

SEMA, Paraná. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos. **Resolução** nº 54, 22 de dezembro de 2006. Define critérios para o controle da qualidade do ar.

SERENGIL, Y.; AUGUSTAITIS, A.; BYTNEROWICZ, A.; GRULKE, N.; KOZOVITZ, A. R.; MATYSSEK, R.; MULLER-STARCK, G.; SCHAUB, M.; WIESER G.; COSKUN, A. A.; PAOLETTI, E. Adaptation of forest ecosystems to air pollution and climate change: a global assessment on research priorities. **Forest**, v. 4, p. 44-48, 2011.

SEXTON, J. O.; URBAN, D. L.; DONOHUE, M. J.; SONG, C. Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. **Remote Sensing of Environment**, v. 128, p. 246-258, 2013.

SHI, Feng; YANG, Bao; VON GUNTEN, Lucien. Preliminary multiproxy surface air temperature field reconstruction for China over the past millennium. **Science China, Earth Sciences**, v. 55, n. 12, p. 2058-2067, 2012.

SHORT, J. R., BENTON, L. M., LUCE, W. B., WALTON, J.; Reconstructing the image of an industrial city. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 83, n. 2, p. 207-224, 1993.

SILVA FILHO, D. F. da.; PIZETTA, P. U. C., ALMEIDA, J. B. S. A. D., PIVETTA, K. F. L.; FERRAUDO, A. S. Banco de dados relacional para cadastro, avaliação e manejo da arborização em vias públicas. **Revista Árvore**, v. 26, n. 5, p. 629-642, 2002.

SILVA, M. N. da Indústria e produção do espaço urbano em Araucária. **Revista Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 12, 2006.

ŠIMATONYTĖ, A.; VENCLOVIENĖ, J. Impact of Sulphur and Nitrogen Dioxide Concentration on Radial Increment Dynamics of Scots Pine (*Pinus Sylvestris* L.) Growing in Cities. **Environmental Research, Engineering and Management = Aplinkos tyrimai, inžinerija ir vadyba**, v. 48, n. 2. p. 25-34, 2009.

SOUZA, S. L. de. **Doenças respiratórias em Araucária/PR (2001 a 2003) – condicionantes socioambientais e poluição atmosférica**. 223f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

STEPKA, T. F. **Modelagem do crescimento e dendrocronologia em árvores nativas de *Araucaria angustifolia*, *Cedrela fissilis* e *Ocotea porosa* no sul do Brasil**. 2012. 186 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

STRAVINSKIENE, V.; BARTKEVICIUS, E.; PLAUSINYTE, E. Dendrochronological research of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth in vicinity of industrial pollution. **Dendrochronologia**, v. 31, p. 179-186, 2013.

STRAVINSKIENE, V.; ERLICKYTE-MARČIUKAITIENE, R. Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) radial growth dynamics in forest stands in the vicinity of “Akmenes cementas” plant. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 17, n. 3, p. 140-147, 2009.

TADANO, Y. S. **Análise do impacto de MP10 na saúde populacional: estudo de caso em Araucária, PR**. Curitiba. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.

TOLUNAY, D. Air pollution effects on annual ring widths of forest trees in mountainous land of Izmir (Turkey). **Water, Air and Soil Pollution: Focus**, v. 3, n. 5-6, p. 233-250, 2003.

TRIPATHI, S. N., DEY, S., TARE, V., SATHEESH, S. K.. Aerosol black carbon radiative forcing at an industrial city in northern India. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 8, 2005.

UNO, I.; OHARA, T.; WAKAMATSU, S. Analysis of wintertime NO₂ pollution in the Tokyo metropolitan area. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 5, p. 703-713, 1996.

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (Estados Unidos) (Ed.). **National Ambient Air Quality Standards for Particle Pollution**. 2006. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/ecas/regdata/RIAs/Executive_Summary.pdf>. Acesso em: 27 de abril de 2015.

VAILSHERY, L. S.; JAGANMOHAN, M.; NAGENDRA, H. Effect of street trees on microclimate and air pollution in a tropical city. **Urban Forestry e Urban Greening**, v. 12, n. 3, p. 408-415, 2013.

VARELA, C. A. **Instrumentos de políticas ambientais, casos de aplicação e seus impactos**. São Paulo: EAESP/FGV/NPP. Relatório de Pesquisa Nº 62, 2001.

WALTON, J. T.; NOWAK, D. J.; GREENFIELD, E. J. Assessing urban forest canopy cover using airborne or satellite imagery. **Arboriculture and Urban Forestry**, v. 34, n. 6, p. 334-340, 2008.

WEBER, C.; PUISSANT, A. Urbanization pressure and modeling of urban growth: example of the Tunis Metropolitan Area. **Remote sensing of environment**, v. 86, n. 3, p. 341-352, 2003.

WILCZYNSKI, S. The variation of tree-ring widths of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) affected by air pollution. **European Journal of Forest Research**, v. 125, n. 3, Jul 2006.

XU, X.; TONG, L.; STOHLGREN, T. J. Tree ring based Pb and Zn contamination history reconstruction in East China: a case study of *Kalopanax septemlobus*. **Environmental Earth Sciences**, v. 71, n. 1, p. 99-106, 2014.

YAMAGUCHI, M., WATANABE, M., TABE, C., NABA, J., MATSUMURA, H., KOHNO, Y., IZUTA, T. Effects of sulfur dioxide on growth and net photosynthesis of six Japanese forest tree species grown under different nitrogen loads. **Trees**, v. 26, n. 6, p. 1859-1874, 2012.

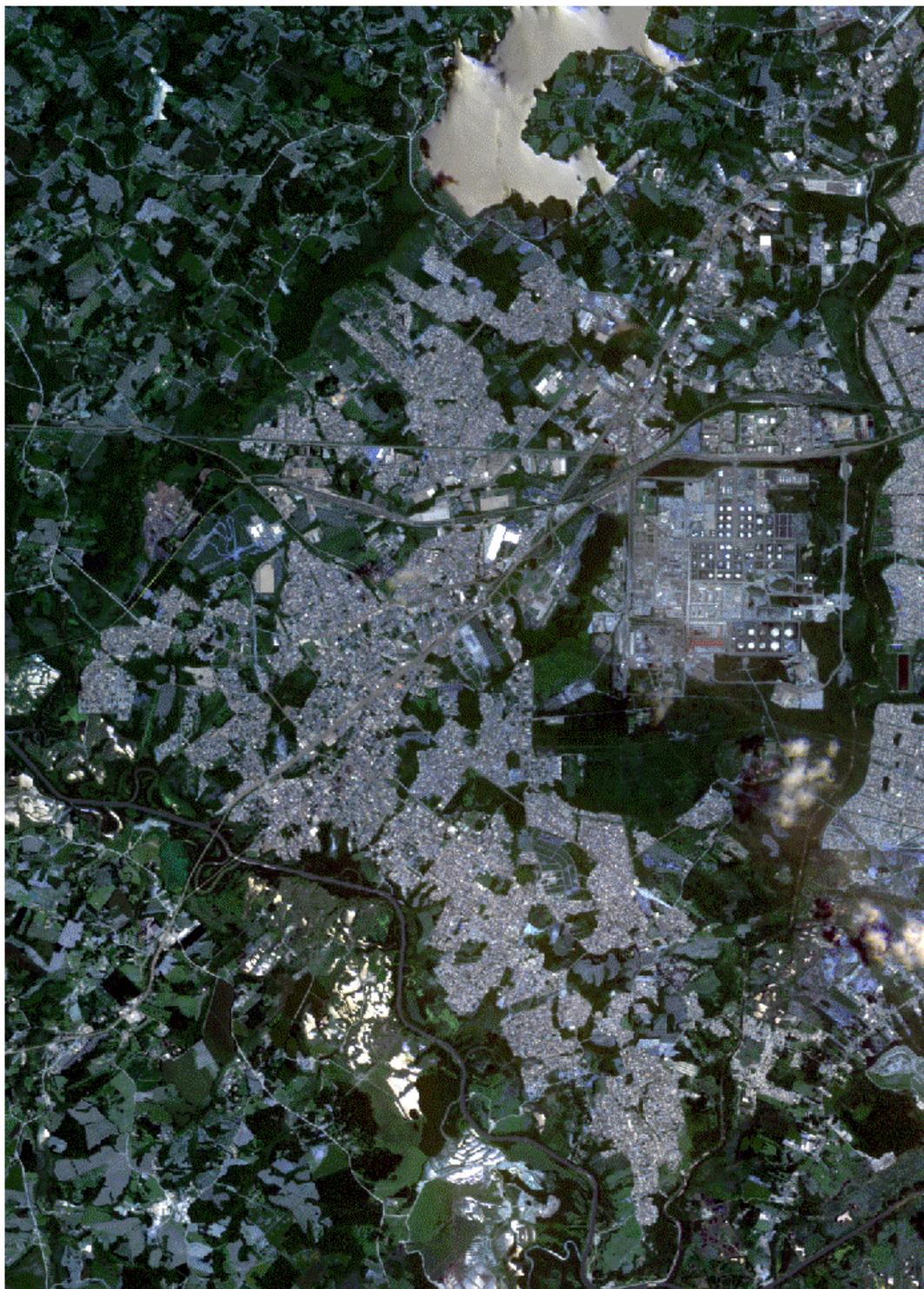
ZHOU, G.; XIONG, S. Comparison of object-oriented and Maximum Likelihood Classification of land use in Karst area. In: **Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)**, 2012 IEEE International. IEEE, 2012. p. 6099-6102.

ANEXOS

ANEXO 1 - COMPOSIÇÃO ESPECTRAL DA IMAGEM DO SATÉLITE SPOT DO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR (2005)	100
ANEXO 2 - COMPOSIÇÃO ESPECTRAL DA IMAGEM DO SATÉLITE RAPIDEYE DO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR (2012)	101



ANEXO 1 – COMPOSIÇÃO ESPECTRAL DA IMAGEM DO SATÉLITE SPOT DO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR (2005)



ANEXO 2 – COMPOSIÇÃO ESPECTRAL DA IMAGEM DO SATÉLITE RAPIDEYE DO PERÍMETRO URBANO DO MUNICÍPIO DE ARAUCÁRIA, PR (2012)