

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E**  
**FLORESTAIS**

**TESE**

**SENSIBILIDADE DA ESPÉCIE *Terminalia catappa* L. DESENVOLVIDA EM  
AMBIENTE URBANO DE INTENSA ATIVIDADE SIDERÚRGICA**

**Thayanne Caroline Castor Neto**

**2022**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E**  
**FLORESTAIS**

**SENSIBILIDADE DA ESPÉCIE *Terminalia catappa* L. DESENVOLVIDA EM  
AMBIENTE URBANO DE INTENSA ATIVIDADE SIDERÚRGICA**

**THAYANNE CAROLINE CASTOR NETO**

*Sob a Orientação do Professor*

**João Vicente de Figueiredo Latorraca**

Tese submetia como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

**Seropédica, RJ**  
**Agosto de 2022**

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Biblioteca Central / Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

N469s Neto, Thayanne Caroline Castor, 1991-  
SENSIBILIDADE DA ESPÉCIE Terminalia catappa L.  
DESENVOLVIDA EM AMBIENTE URBANO DE INTENSA ATIVIDADE  
SIDERÚRGICA / Thayanne Caroline Castor Neto. -  
Seropédica, 2022.  
73 f.

Orientador: João Vicente de Figueiredo Latorraca.  
Tese(Doutorado). -- Universidade Federal Rural do  
Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciências  
Ambientais e Florestais, 2022.

1. Dendrocronologia. 2. Dendroquímica. 3. Poluição  
atmosférica. 4. Arborização urbana. I. Latorraca, João  
Vicente de Figueiredo, 1962-, orient. II Universidade  
Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós  
Graduação em Ciências Ambientais e Florestais III.  
Título.

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

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO**  
**INSTITUTO DE FLORESTAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS E**  
**FLORESTAIS**

**THAYANNE CAROLINE CASTOR NETO**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora em Ciências Ambientais e Florestais**, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, Área de Concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM: 30/08/2022.

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 10:47 )*  
JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)  
Matrícula: 1216943

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 11:20 )*  
JONNYS PAZ CASTRO  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 899.259.122-53

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 15:39 )*  
JOSE LUÍS PENETRA CERVEIRA LOUZADA  
ASSINANTE EXTERNO  
Passaporte: M664442

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 10:51 )*  
CLAUDIA FONTANA  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 014.924.689-75

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 11:10 )*  
JAIR FIGUEIREDO DO CARMO  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 346.198.791-34

Para verificar a autenticidade deste documento entre em  
<https://sipac.ufrrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1058**, ano:  
**2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **07/10/2022** e o código de verificação: **1f833d2b5f**

*Aos meus pais  
Maristela Santos Castor (in memoriam) e  
Lincoln José Neto (in memoriam)  
Com todo o meu amor*

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, berço da minha história, onde cresci brincando no lago do P1, salas da Reitoria e Ginásio Esporte. Onde também iniciei minha trajetória no curso de Engenharia Florestal e hoje, finalizo o doutorado. A Rural me traz lembranças e sentimentos incríveis, principalmente relacionados aos meus pais, que mesmo antes de se conhecerem, já trabalhavam nesta instituição. Terei eterno saudosismo por esta Universidade tão linda, inspiradora e acolhedora.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais pela oportunidade de cursar o doutorado e aprender com docentes brilhantes.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo auxílio financeiro durante todo o doutorado e pela grande oportunidade de realizar o Doutorado Sanduíche em outro país.

Ao meu orientador, Professor Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca, pela compreensão nos tempos difíceis, atenção quando precisei e todas as orientações durante o doutorado.

Aos membros dessa banca, Dra. Cláudia Fontana, Prof. Dr. José Lousada, Prof. Dr. Jair Figueiredo e Prof. Dr. Jonnys Castro, por terem aceitado o convite. É um grande prazer tê-los em minha banca de defesa.

Agradeço à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD) e ao Prof. Dr. José Louzada, que aceitou ser meu supervisor durante o período de doutorado sanduíche, em Portugal, e que desde o primeiro contato por e-mail foi muito receptivo. Te admiro muito, Professor. Obrigada por ter me recebido tão bem, pela atenção quando precisei e por todas as orientações e conversas.

Aos amigos que fiz em Portugal, em especial Marisa Lopes, Teresa Enes, Luís Braz, Catarina Guerra, Luísa, Nazareth Crespo, Helia Gonçalves, Virgínia Duro e Rita. Grandes companheiros de almoço na cantina ou no panorâmico da UTAD, cafezinho e boas conversas, finos de fins de semana, passeios, jantares e festas no Tralha com direito a muito “Hey Jude” e “Mal acostumado”. À dona Nazaret pela moradia, carinho e cuidado comigo. Agradeço ao senhor Armindo, técnico do laboratório da Florestal que também me orientou e se tornou um amigo muito querido. Ao técnico do laboratório de química,

Carlos Matos pela amizade, conversas e pelo empenho durante as análises químicas. Às amigas brasileiras Maria Naruna, Dalila Lopes e Prof. Fátima Piña-Rodrigues, que tive o prazer de conhecer e conviver. Queridos amigos, guardo todos no coração e espero um dia revê-los.

Aos queridos amigos da Rural, durante o doutorado, Anne, Danilo, Maristela, Fábio, Aécio, Poliane, Jonnys, Cadu, Victória, Wayka e Zé. Obrigada pela amizade, companheirismo, apoio, conversas, risadas, festas e tantos churrascos. Vocês são muito queridos, obrigada por tudo!

Aos amigos de vida, Aline Melandre, Anderson Audi, Fernanda Tavares, Jéssica Furlan, Caroline Nunes, Carolina Gomes, Rafael Trés, Caio Chain, Ana Carolina Araújo e Alinne Santos. Obrigada pela amizade, companheirismo e grandes histórias.

À minha família, em especial minha tia Benigna e meu tio Antônio, que cuidam de mim como filha, os quais tenho tamanha gratidão. À Dora e ao Waninho, que estão sempre presentes na minha vida. À tia Dalva, que também está sempre presente e é muito querida.

Ao meu pai, Lincoln José Neto pela influência na escolha do curso de Engenharia Florestal, a quem tenho muito respeito e admiração, ainda que tenhamos convivido por pouco tempo. E a minha querida mãe Maristela Santos Castor, a quem sou eternamente grata por todo cuidado, amor, dedicação e educação. Gostaria muito que estivesse comigo nesse momento, mas tenho certeza de que está muito orgulhosa de mim. Eu termino esse doutorado por você! Te amo, mãe, para sempre.

E agradeço ao meu amado Deus por todas as bençãos, pela proteção e pela força até este momento da minha vida.

## **RESUMO GERAL**

NETO, Thayanne Caroline Castor. **Sensibilidade da espécie *Terminalia catappa* L. desenvolvida em ambiente urbano de intensa atividade siderúrgica.** 2022. 71 p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais). Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

As árvores conseguem interceptar e acumular eficientemente os elementos que estão em suspensão no ar e/ou em deposição no solo através de suas estruturas. O presente estudo teve como objetivos avaliar o crescimento de árvores da espécie *T. catappa* desenvolvidas em ambiente urbano de intensa atividade siderúrgica e determinar as concentrações dos metais acumulados em sua madeira, nos diferentes períodos do crescimento e em suas cascas. Pelo menos duas amostras de madeira foram obtidas de cada árvore com o auxílio de um trado de incremento, no sentido casca-medula, através de uma incisão no tronco a 1,30 m de altura em relação ao solo. Os elementos Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, Fe, Mn e Zn foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica. A análise dendrocronológica de *T. catappa* indicou sensibilidade aos índices de precipitação e temperatura em área mais exposta à poluição, visto que ocorreram diferenças no crescimento. Após análise química, foi identificado que o arsênio e o chumbo foram os elementos que apresentaram maiores concentrações na madeira e na casca, respectivamente. Portanto, a possibilidade de analisar os anéis de crescimento da espécie *T. catappa* contribui para a realização de estudos dendrocronológicos futuros, em diversas escalas regionais. Além disso, os resultados das concentrações dos elementos são importantes para inferir a respeito dos níveis passados e atuais de poluição atmosférica.

**Palavras-chave:** Dendrocronologia, Dendroquímica, Poluição atmosférica, Arborização urbana.

## GENERAL ABSTRACT

NETO, Thayanne Caroline Castor. **Sensitivity of *Terminalia catappa* L. tree developed in an urban environment under intensive steel industry activity.** 2022. 71 p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forestry Science). Forest Institute, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

Trees can efficiently intercept and accumulate elements that are suspended in the air and/or deposited on the ground through their structures. The present study aimed to evaluate the growth of trees of the species *T. catappa* developed in an urban environment of intense steelmaking activity and to determine the concentrations of metals accumulated in their wood, in the different periods of growth and in their bark. At least two wood samples were obtained from each tree with the aid of an increment auger, in the bark-medulla direction, through an incision in the trunk at a height of 1.30 m in relation to the ground. The elements Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, Ni, Fe, Mn, and Zn were quantified by atomic absorption spectrophotometry. The dendrochronological analysis of *T. catappa* indicated sensitivity to precipitation and temperature in an area most exposed to pollution since there were differences in growth. After chemical analysis, it was identified that arsenic and lead were the elements with the highest concentrations in wood and bark, respectively. Therefore, the possibility of analyzing the growth rings of the species *T. catappa* contributes to the realization of future dendrochronological studies, at different regional scales. In addition, the results of element concentrations are important for inferring past and current levels of air pollution.

**Keywords:** Dendrochronology, Dendrochemistry, Atmospheric pollution, Urban afforestation.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Características estatísticas da cronologia residual da espécie <i>T. catappa</i> nos locais de estudo.....	12
<b>Tabela 2.</b> Análise de regressão entre as concentrações de casca e madeira. ....	27
<b>Tabela 3.</b> Dados dendrométricos das árvores de <i>T. catappa</i> na região noroeste.....	57
<b>Tabela 4.</b> Dados dendrométricos das árvores de <i>T. catappa</i> na região sudeste.....	57
<b>Tabela 5.</b> Dados dendrométricos das árvores de <i>T. catappa</i> em Resende.....	58
<b>Tabela 6.</b> Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de <i>T. catappa</i> ( $\pm$ desvio padrão) e valores de significância entre os locais de estudo (Resende, Volta Redonda e regiões SE e NO).....	59
<b>Tabela 7.</b> Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de <i>T. catappa</i> ( $\pm$ desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores de Resende.....	59
<b>Tabela 8.</b> Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de <i>T. catappa</i> ( $\pm$ desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores de Volta Redonda.....	60
<b>Tabela 9.</b> Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de <i>T. catappa</i> ( $\pm$ desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores da região SE.....	60
<b>Tabela 10.</b> Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de <i>T. catappa</i> ( $\pm$ desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores da região NO.....	61
<b>Tabela 11.</b> Valores das concentrações dos elementos detectados na casca de <i>T. catappa</i> ( $\pm$ desvio padrão) e valores de significância entre os locais de estudo (Resende, Volta Redonda e regiões SE e NO).....	61

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representação das áreas de estudo.....	3
<b>Figura 2.</b> Imagem macroscópica do lenho de <i>T. catappa</i> . .....	10
<b>Figura 3.</b> Incremento radial acumulado (IRA) da espécie <i>T. catappa</i> nas regiões de estudo. ....	11
<b>Figura 4.</b> Índice de crescimento dos anéis de <i>T. catappa</i> nas regiões de estudo.....	13
<b>Figura 5.</b> Correlações entre a largura dos anéis de <i>T. catappa</i> e variáveis climáticas (1961–2018) na região noroeste. ....	14
<b>Figura 6.</b> Correlações entre a largura dos anéis de <i>T. catappa</i> e variáveis climáticas (1961–2018) na região sudeste. ....	15
<b>Figura 7.</b> Correlações entre a largura dos anéis de <i>T. catappa</i> e variáveis climáticas (1961–2018) em Resende.....	16
<b>Figura 8.</b> Concentração média dos elementos acumulados na madeira da espécie <i>T. catappa</i> em Resende e Volta Redonda.....	27
<b>Figura 9.</b> Concentração média dos elementos acumulados na madeira da espécie <i>T. catappa</i> nas regiões sudeste (SE) e noroeste (NO).....	28
<b>Figura 10.</b> Concentração média dos elementos acumulados na madeira de <i>T. catappa</i> em diferentes períodos do crescimento em Resende. ....	28
<b>Figura 11.</b> Concentração média dos elementos acumulados na madeira de <i>T. catappa</i> em diferentes períodos do crescimento em Volta Redonda. ....	29
<b>Figura 12.</b> Concentração média dos elementos acumulados na madeira de <i>T. catappa</i> em diferentes períodos do crescimento na região sudeste. ....	29
<b>Figura 13.</b> Concentração média dos elementos acumulados na madeira de <i>T. catappa</i> em diferentes períodos do crescimento na região noroeste. ....	30
<b>Figura 14.</b> Concentração média dos elementos acumulados nas cascas da espécie <i>T. catappa</i> em Resende e Volta Redonda.....	30
<b>Figura 15.</b> Concentração dos elementos acumulados nas cascas da espécie <i>T. catappa</i> nas regiões sudeste e noroeste.. ....	31
<b>Figura 16.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. a) alumínio; b) ferro. ....	31
<b>Figura 17.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. c) zinco; d) manganês.....	32

<b>Figura 18.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. e) cobre; f) chumbo .....	32
<b>Figura 19.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. g) níquel; h) cromo.....	33
<b>Figura 20.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. i) arsênio; j) cádmio. ....	33
<b>Figura 21.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. a) alumínio; b) ferro. ....	34
<b>Figura 22.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. c) zinco; d) manganês.....	34
<b>Figura 23.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. e) cobre; f) chumbo. ....	35
<b>Figura 24.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. g) níquel; h) cromo.....	35
<b>Figura 25.</b> Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. i) arsênio; j) cádmio. ....	36

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	1
Área de Estudo e Amostragem .....	2
OBJETIVOS .....	4
CAPÍTULO I .....	5
CRESCIMENTO DA ESPÉCIE <i>Terminalia catappa</i> L. EM AMBIENTE URBANO ...	5
RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
1 INTRODUÇÃO .....	8
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3 RESULTADOS .....	10
4 DISCUSSÃO .....	17
5 CONCLUSÕES .....	20
CAPÍTULO II.....	21
CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS NA MADEIRA E NA CASCA DE ÁRVORES DA ESPÉCIE <i>Terminalia catappa</i> L. EM AMBIENTE URBANO .....	21
RESUMO .....	22
ABSTRACT .....	23
1 INTRODUÇÃO .....	24
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3 RESULTADOS .....	27
4 DISCUSSÃO .....	37
5 CONCLUSÕES .....	42
CONCLUSÕES GERAIS .....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
APÊNDICE A – DADOS DENDROMÉTRICOS DAS ÁRVORES AMOSTRADAS NAS REGIÕES DE VOLTA REDONDA (NOROESTE E SUDESTE) E RESENDE	57
APÊNDICE B – CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS ACUMULADOS NA MADEIRA E NAS CASCAS DA ESPÉCIE <i>Terminalia catappa</i> NAS DIFERENTES REGIÕES E NOS DIFERENTES PERÍODOS DO CRESCIMENTO.....	59

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

As árvores urbanas desempenham um papel importante na melhoria da qualidade do ar, na saúde dos seres humanos e na adaptação e mitigação às mudanças climáticas através de seus serviços ecossistêmicos (LOCOSSELLI et al., 2019; ROELAND et al., 2019). Dentre esses serviços, a capacidade de filtrar a poluição do ar recebe grande destaque, uma vez que os poluentes relacionados à industrialização e ao crescimento da população são capazes de gerar efeitos preocupantes tanto no ambiente como na saúde humana (BALLIKAYA et al., 2022). Portanto, as árvores conseguem interceptar e acumular grande parte desses poluentes através de suas cascas, troncos e folhas (MANES et al., 2012; NOWAK et al., 2013; MOREIRA et al., 2018; SICARD et al., 2018; HAN et al., 2020), de forma que, podem fornecer informações importantes sobre a qualidade de um ambiente e contribuir para a realização de estudos sobre biomonitoramento em locais potencialmente afetados, a longo e curto prazos.

Estudos apontam que é possível reconstruir um histórico de poluição ambiental de uma região utilizando espécies florestais, tanto por meio de análises dendroquímicas (COCOZZA et al., 2016; SCHARNWEBER et al., 2016; BALLIKAYA et al., 2022; ISINKARALAR, 2022) quanto por meio de análises de cascas (COCOZZA et al., 2016; BRIGNOLE et al., 2018; MARTIN et al. 2018; AUSTRUY et al. 2019; CHAPARRO et al., 2020). No Brasil, embora relevantes, ainda são poucos os estudos que versam sobre esses temas (por exemplo, CHAGAS, 2013; GERALDO et al., 2014; MOREIRA et al., 2016; LOCOSSELLI et al., 2018; LOCOSSELLI et al., 2019; LOCOSSELLI et al., 2020), principalmente no estado do Rio de Janeiro (por exemplo, SOUZA et al., 2019; VASCONCELLOS et al., 2019). Por esse motivo, a escolha do local para o desenvolvimento desta tese considerou o aspecto histórico poluidor, a relevância da cidade e a escassez de estudos com essa temática na região.

A cidade de Volta Redonda, escolhida para o presente estudo, é conhecida como “cidade do aço”, pois tornou-se sede e iniciou as atividades de sua usina siderúrgica entre os anos de 1941 e 1950. O município formou-se no entorno da indústria e foi organizado e planejado para que os trabalhadores estivessem próximos à usina (PALMEIRA, 2012). Desde então, com a usina em atividade, a poluição atmosférica da região de Volta Redonda tornou-se um problema recorrente. Em 2003, foi considerado o segundo município com o maior potencial poluidor do estado do Rio de Janeiro, responsável pela emissão de 4.031 toneladas de material particulado ( $PM_{10}$ ) (SOR et al., 2008) e, portanto, motivo de reclamação da população pelas condições da qualidade do ar na região (SILVA, 2019).

Além da escolha do local, a escolha da espécie também considerou alguns aspectos. A abundância de indivíduos, identificada por levantamento, e o potencial dendrocronológico da espécie, descrito na literatura por Chagas (2009). A espécie *Terminalia catappa* L., pertencente à família Combretaceae, conhecida popularmente como, amendoeira, castanhola, chapéu-de-sol e sete-copas, é uma árvore originária da Ásia e Madagascar, apresenta crescimento monopodial e seus ramos crescem em disposição horizontal (LORENZI, 2003). Em ambientes urbanos, geralmente atinge de 15 a 25 m de altura, com tronco retilíneo e uma copa ampla, de diâmetro semelhante à altura da árvore, e diâmetro na altura do peito podendo chegar até 1,5 m (THOMSON; EVANS, 2006). Cresce em solos arenosos, argilosos ou pobres, embora atinja seu melhor crescimento em solos arenosos e se desenvolve bem em altitudes de 0 a 1200 m (FLORES, 2003). Suas cascas apresentam fissuras verticais contínuas e rachaduras horizontais descontínuas, produzindo uma aparência de grade (IVANI et al., 2008). As suas folhas são obovadas, coriáceas, alternas espiraladas, podem chegar a medir até 30 cm e são brevemente decíduas durante a estação seca. (IVANI et al., 2008; THOMSON; EVANS, 2006). A amendoeira foi introduzida e naturalizada em muitas partes tropicais do mundo, incluindo o

Brasil (THOMSON; EVANS 2006). No País, sua distribuição geográfica está confirmada em todas as regiões do país, principalmente em áreas antrópicas (RIBEIRO et al., 2020).

A presente tese está estruturada em dois capítulos. O primeiro capítulo apresenta o estudo dendrocronológico da espécie *T. catappa* em ambiente urbano, sob intensa atividade siderúrgica, e discute a dinâmica do crescimento desta espécie nas diferentes regiões estudadas. O segundo capítulo apresenta um estudo integrado sobre a acumulação de metais pesados na madeira e nas cascas das árvores de *T. catappa* e aponta a distribuição desses elementos nas regiões avaliadas. Ao final são encontradas as conclusões gerais acerca do que foi desenvolvido no presente estudo.

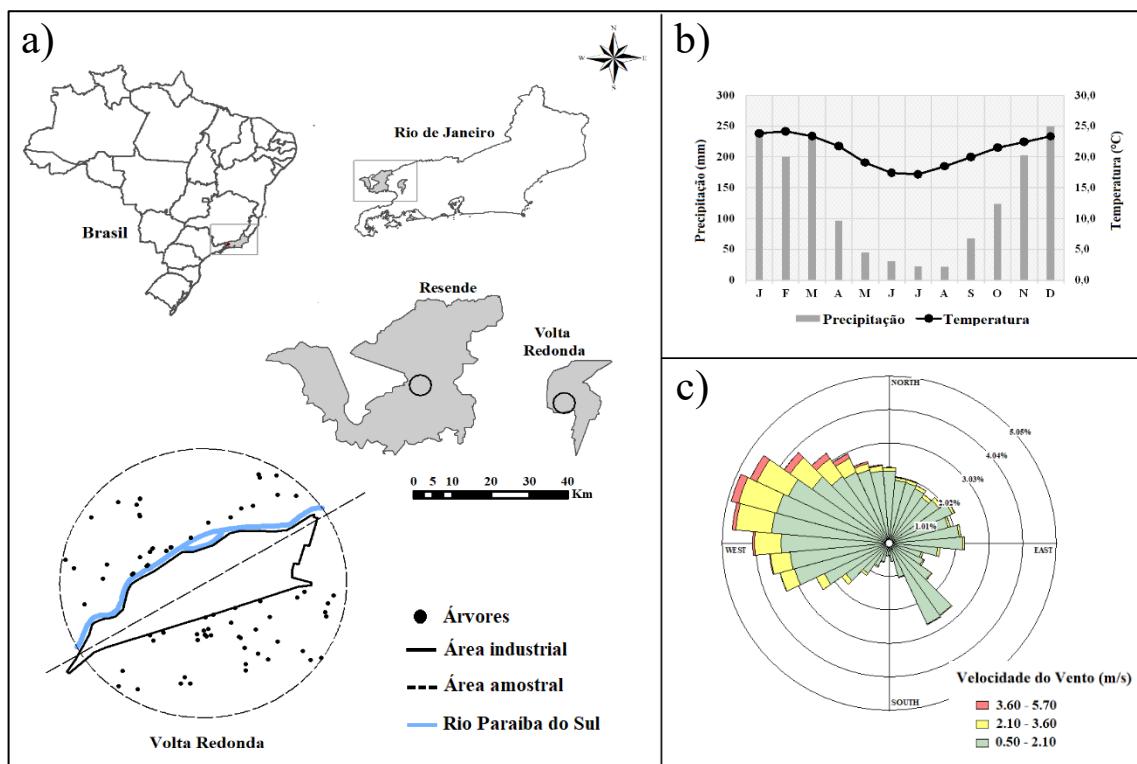
## 1.1 Área de Estudo e Amostragem

O estudo foi conduzido nos municípios de Volta Redonda ( $22^{\circ}31'23''$  S,  $44^{\circ}06'15''$  W) e Resende ( $22^{\circ}27'46''$  S,  $44^{\circ}27'20''$  W), sendo este último para fins de controle das amostras, uma vez que está a, aproximadamente, 40 km de distância de uma imponente indústria siderúrgica em Volta Redonda. Ambos estão localizados na região Médio Paraíba do Sul, no estado do Rio de Janeiro. A altitude em Volta Redonda varia de 363 m a 707 m a.n.m. nas margens do rio Paraíba do Sul, enquanto na área central é de 380,3 m (GIODA et al., 2004). Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é Cwa (zona subtropical úmida, com inverno seco e verão quente) (ALVARES et al. 2013). A precipitação média anual é de 1.337 mm e a temperatura média é de  $21^{\circ}\text{C}$  (ROCHA; GUIMARÃES, 2017). Fevereiro é o mês mais quente ( $24^{\circ}\text{C}$ ) e julho o mais frio ( $17^{\circ}\text{C}$ ) (MONTINE et al., 2014). A estação seca ocorre de abril a setembro e a estação chuvosa ocorre de outubro a março.

Inicialmente foi realizado um levantamento dos indivíduos de *T. catappa* presentes nos arredores da siderúrgica, em um raio de 2500 m. Também foram estabelecidas duas regiões para coleta (noroeste e sudeste) considerando os níveis de poluição no município e a direção predominante do vento. Localizada à esquerda do Rio Paraíba do Sul, a região noroeste apresenta níveis mais elevados de poluição, e a região sudeste, localizada à direita do mesmo rio, níveis menos elevados (PEITER; TOBAR, 1998). A direção predominante do vento é para o sentido noroeste (Figura 1), segundo levantamento dos dados disponibilizados pelo INEA entre o período de 2001 a 2018. Dos 110 indivíduos de *T. catappa* encontrados e georreferenciados em Volta Redonda, 86 árvores, em bom estado fitossanitário, foram escolhidas para a realização deste estudo, sendo 40 na região sudeste e 35 na região noroeste. Em Resende, 11 árvores foram amostradas.

Os dados mensais de precipitação e temperatura da estação meteorológica mais próxima dos locais de coleta (estação Resende) foram obtidos por meio do Instituto Nacional de Meteorologia – INMET entre o período de 1961 a 2018, período este posterior a instalação da siderúrgica na cidade de Volta Redonda (1941).

A representação das áreas de estudo, os pontos de coleta, o diagrama climático e o diagrama da rosa dos ventos da região estão ilustrados na Figura 1.



**Figura 1.** Representação das áreas de estudo. a) Delimitação da área amostral e os pontos de coleta; b) Diagrama climático da estação meteorológica de Resende; c) Diagrama da rosa dos ventos da região de Volta Redonda, Rio de Janeiro/Brasil.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Geral**

Investigar se é possível determinar a presença de elementos potencialmente tóxicos na madeira e na casca da espécie *Terminalia catappa* L. crescendo em ambiente urbano de intensa atividade siderúrgica e se seu crescimento é influenciado pelo clima local.

### **2.2 Específicos**

- Construir uma cronologia de anéis de crescimento;
- Investigar se existe diferença nas idades e no crescimento radial das árvores nos diferentes locais de estudo;
- Investigar o efeito do clima e da poluição no crescimento das árvores;
- Determinar as concentrações dos elementos alumínio, ferro, zinco, manganês, cobre, chumbo, níquel, cromo, arsênio e cádmio na madeira e na casca;
- Verificar se as concentrações dos elementos químicos acumulados na madeira diferem em função dos períodos de crescimento radial e nas cascas.

## **CAPÍTULO I**

**CRESCIMENTO RADIAL DA ESPÉCIE *Terminalia catappa* L. EM AMBIENTE URBANO**

## **RESUMO**

À medida que se estuda a dinâmica de crescimento de uma espécie lenhosa em determinado ambiente, melhor é a compreensão das estratégias desenvolvidas em prol de sua adaptação. Portanto, o presente estudo teve como objetivos realizar a análise dos anéis de crescimento e avaliar o efeito do ambiente urbano, sob intensa atividade industrial siderúrgica, no crescimento de *T. catappa*. Pelo menos duas amostras de madeira foram obtidas de cada árvore com o auxílio de um trado de incremento. Nos três locais de estudo, a espécie apresentou anéis de crescimento distintos, visíveis a olho nu. O potencial dendrocronológico de *T. catappa* indicou sensibilidade aos índices de precipitação e temperatura em área mais exposta à poluição urbana e siderúrgica, visto que ocorreram diferenças no crescimento quando comparada com área menos exposta à poluição. Sendo assim, a delimitação dos anéis de crescimento da espécie *T. catappa* nesse estudo contribui para a realização de estudos dendrocronológicos futuros, ampliando a compreensão do comportamento dessa espécie presente em ambientes urbanos em diversas escalas regionais.

**Palavras-chave:** dendrocronologia, árvores urbanas, poluição atmosférica

## **ABSTRACT**

As the growth dynamics of a woody species in each environment is studied, the better is the understanding of the strategies developed in favor of its adaptation. Therefore, the present study aimed to analyze the growth rings and evaluate the effect of the urban environment, under intense industrial activity, on the growth of *T. catappa*. At least two wood samples were obtained from each tree with an increment borer. In the three study sites, the species showed distinct growth rings, visible to the naked eye. The dendrochronological potential of *T. catappa* indicated sensitivity to precipitation and temperature in a more exposed urban and industrial steel pollution area since there were differences in growth when compared to an area less exposed to the same pollution. Thus, the delimitation of the growth rings of the species *T. catappa* in this study contributes to the realization of future dendrochronological studies, expanding the understanding of the behavior of this species present in urban environments at different regional scales.

**Keywords:** dendrochronology, urban trees, atmospheric pollution

## 1 INTRODUÇÃO

À medida que se estuda a dinâmica de crescimento de uma espécie lenhosa em determinado ambiente, melhor é a compreensão das estratégias desenvolvidas em prol de sua adaptação. As árvores reagem de acordo com as variáveis ambientais, o que pode refletir na atividade cambial e na formação dos anéis de crescimento, expressando eventos que ocorreram tanto no passado quanto no ano presente (TOMAZELLO-FILHO et al., 2001). O clima, por exemplo, é considerado um dos mais importantes moduladores do crescimento das árvores (LOCOSSELLI et al., 2019) e nesse sentido, a dendrocronologia possibilita não só a determinação da idade, como também o estudo do desempenho das árvores em função dos fatores que as fizeram crescer (FONTANA et al., 2018), tanto em meio natural quanto urbano.

Geralmente, o ambiente urbano apresenta condições ambientais menos favoráveis. As árvores que estão presentes nesses ambientes ficam expostas ao estresse térmico, a seca do solo e a baixa umidade do ar (GILLNER et al. al., 2014). Portanto, esses fatores podem contribuir para o aumento da vulnerabilidade do desenvolvimento das árvores (LOCOSSELLI et al., 2019). Vinculada ao meio urbano, a poluição atmosférica é considerada uma das mais importantes preocupações ambientais (VOLNÁ et al., 2021). Por ser um problema crítico, principalmente para a saúde humana, o monitoramento desses poluentes tornou-se imprescindível em meio à urbanização (ISINKARALAR, 2022).

Considerando a sensibilidade das espécies ao registrarem as modificações no ambiente, estudos dendrocronológicos têm sido realizados para observar o efeito da poluição atmosférica no crescimento de espécies arbóreas (por exemplo, BATTIPAGLIA et al., 2010; BARTENS et al., 2012; GILLNER et al. al., 2014; SENSUŁA et al., 2017; KUKARSKIH et al., 2022). No entanto, no Brasil, ainda são poucos os estudos que versam sobre o mesmo efeito em árvores urbanas (por exemplo, CHAGAS, 2009; CHAGAS, 2013; GERALDO et al., 2014; LOCOSSELLI et al., 2019; VASCONCELLOS et al., 2019), os quais utilizaram as espécies *Tabebuia pentaphylla* e *Poincianella pluviosa* (CHAGAS, 2013), *Tipuana tipu* (GERALDO et al., 2014; LOCOSSELLI et al., 2019) e *Ceiba speciosa* (VASCONCELLOS et al., 2019). Portanto, a busca por diferentes espécies pode ser interessante para difundir o conhecimento e ampliar a realização dos estudos nessa temática.

Nesse contexto, as árvores da espécie *T. catappa* são comuns na maioria das cidades do Brasil, principalmente em áreas urbanas (RIBEIRO et al., 2020), porém, ainda não está claro sobre a dinâmica de crescimento desta espécie em ambiente urbano e se a exposição à poluição atmosférica pode interferir na formação dos anéis nesses ambientes. Portanto, o presente estudo teve como objetivos realizar a análise dos anéis de crescimento e avaliar o efeito do ambiente urbano, sob intensa atividade industrial siderúrgica, no crescimento de *T. catappa*. Sabendo que essa espécie possui potencial dendrocronológico (CHAGAS, 2009), espera-se encontrar diferenças no crescimento e nas respostas às condições climáticas por possíveis interferências da poluição atmosférica. Dessa maneira, por ser uma espécie consolidada na arborização urbana, o estudo de sua dinâmica de crescimento em ambiente antrópico pode contribuir para que futuros estudos sejam realizados em diferentes escalas regionais.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Pelo menos duas amostras de madeira foram obtidas de cada árvore com o auxílio de um trado de incremento (sonda Pressler), no sentido casca-medula, através de uma incisão no tronco a 1,30 m de altura em relação ao solo. Após a coleta, essas baguetas foram coladas em suporte de madeira e posteriormente polidas com uma sequência de lixas (entre 80-1200 grãos/mm<sup>2</sup>) para destacar o plano transversal. As amostras foram escaneadas a 1200 dpi para as análises e contagem dos anéis de crescimento.

A largura dos anéis de crescimento foi mensurada utilizando o programa CooRecorder versão 7.8 (Cybis Elektronik & Data AB, Sweden) com uma precisão de 0,01 mm nas imagens digitalizadas. Utilizou-se o software COFECHA para verificar estatisticamente a datação cruzada e a qualidade da mensuração dos anéis (HOLMES et al., 1986; GRISSINO-MAYER, 2001), no qual foram utilizados segmentos de 30 anos com sobreposições de 15 anos. Em seguida, o software ARSTAN foi utilizado com o intuito de remover a tendência da idade biológica de séries individuais e ajustar um sinal de crescimento comum entre as árvores (COOK; HOLMES, 1996), por isso, o modelo spline de suavização cúbica (50% de variância mantida em segmentos de 20 anos) foi utilizado no ajuste de cada série. Durante este processo, uma série individual de anéis foi considerada não confiável se tivesse um baixo valor de correlação com todas as outras séries e sob essas circunstâncias, essa série foi rejeitada para melhorar o sinal comum (BRIENEN; ZUIDEMA 2005).

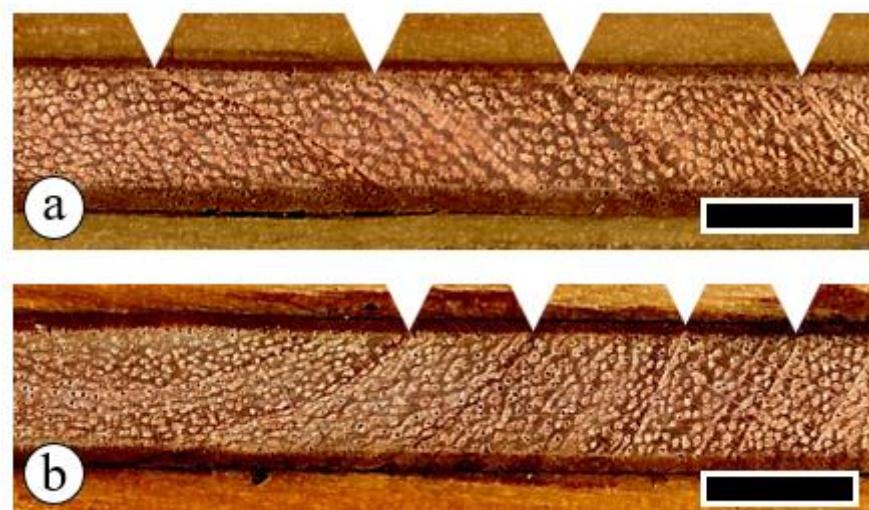
Em cada local, a cronologia média final foi construída a partir do conjunto de todas as séries padronizadas da largura dos anéis das árvores de suas populações. A cronologia *standard* foi utilizada para realizar as correlações de Pearson entre crescimento e variáveis climáticas locais, tanto para o ano corrente e ano anterior, quanto para os períodos de estação seca e estação chuvosa. Com esse intuito, utilizou-se dados mensais de precipitação e temperatura entre 1961 e 2019 obtidos da estação meteorológica mais próxima aos locais estudados (estação de Resende). Os dados foram obtidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET.

Além disso, para avaliar as propriedades das cronologias (BRIFFA; JONES, 1990), a média das larguras dos anéis, a sensibilidade média, a correlação entre as séries, *Running Bar* (RBar), e o sinal populacional expresso (EPS) (FRITTS, 1976; SPEER, 2010) foram calculados para cada local de estudo a partir da cronologia residual.

Antes da realização das análises estatísticas, todos os resultados quantitativos foram testados para normalidade e homocedasticidade por meio dos testes de Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente. Os valores que não seguiram uma distribuição normal foram submetidos à transformação logarítmica. Os resultados dos incrementos radiais foram comparados entre si pelo teste t de Student a um nível de confiança de 95% e seguiram as recomendações de Zar (2010).

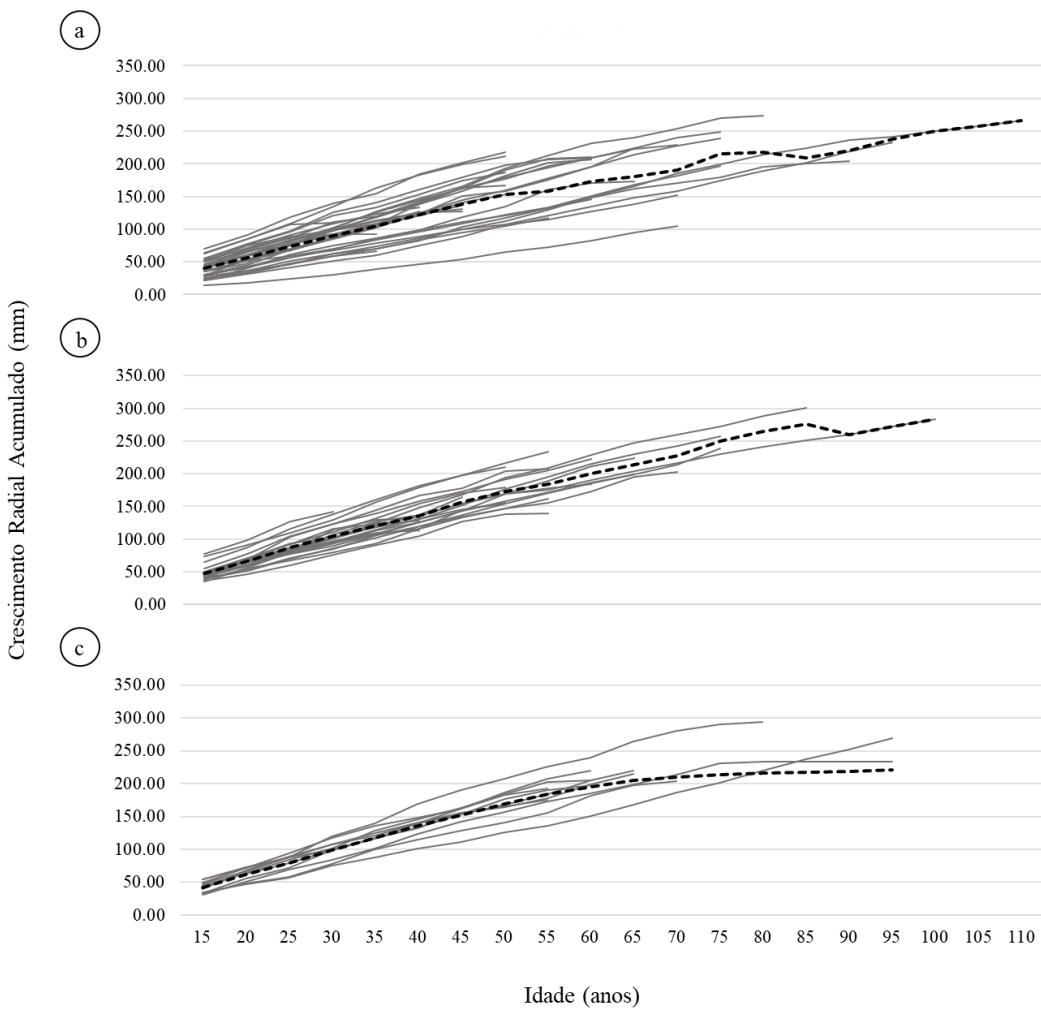
### 3 RESULTADOS

Nos três locais de estudo, a espécie *T. catappa* apresentou anéis de crescimento distintos, visíveis a olho nu, delimitados ora pela formação de uma fina linha de parênquima axial marginal, ora pela confluência do parênquima paratraqueal aliforme losangular (Figura 2a) e muitas vezes associados ao alinhamento dos vasos, zonas fibrosas e pequenas diferenças no diâmetro dos vasos na transição para o anel seguinte (Figura 2b).



**Figura 2.** Imagem macroscópica do lenho de *T. catappa*. Seção transversal indicando as delimitações dos anéis de crescimento. Barras: 5 mm.

O incremento radial acumulado foi similar entre as árvores das regiões de Volta Redonda e superior nas árvores de Resende (Figura 3). As árvores da região noroeste ultrapassaram o valor médio de 200 mm de incremento acumulado em aproximadamente 75 anos de idade, enquanto as árvores da região sudeste alcançaram esse valor com uma idade aproximada de 60 anos. Em Resende, as árvores com idade entre 60 e 65 anos apresentaram incremento acumulado de 200 mm. Contudo, as árvores mais longevas estavam, em sua maioria, na região mais poluída (noroeste), apresentando idades estimadas em até 110 anos. As árvores da região sudeste apresentaram até 104 anos de idade e os indivíduos mais jovens concentraram-se em Resende, com idade máxima de 95 anos. Observa-se ainda que a média máxima do incremento radial acumulado ocorreu nas árvores da região noroeste, com 266,51 mm aos 110 anos. Nas árvores do sudeste com 282,73 mm aos 100 anos e as árvores de Resende com 220,44 mm aos 95 anos de idade.



**Figura 3.** Incremento radial acumulado (IRA) da espécie *T. catappa* nas regiões de estudo. (a) noroeste, (b) sudeste e (c) Resende. Linha tracejada representa o crescimento médio.

As árvores da região noroeste ( $n=32$ ) apresentaram idade média de 50 anos, incremento radial anual e radial acumulado de 2,80 mm/ano ( $DP \pm 0,49$ ) e 158,66 mm ( $DP \pm 46,30$ ), respectivamente. Na região sudeste ( $n=24$ ), as árvores apresentaram idade média de 47 anos, com incremento radial anual de 2,96 mm/ano ( $DP \pm 0,40$ ) e o incremento radial acumulado de 163,57 mm ( $DP \pm 41,69$ ). Em Resende ( $n=11$ ), as árvores apresentaram idade média de 59 anos. O incremento radial anual foi de 3,50 mm/ano ( $DP \pm 0,48$ ) e o incremento radial acumulado foi de 201,33 mm ( $DP \pm 43,02$ ). Ou seja, embora o número amostral em Resende tenha sido menor, as árvores apresentaram maior crescimento médio do que as árvores em Volta Redonda. Os valores dos incrementos radiais anual e acumulado, bem como os valores dendrométricos das árvores utilizadas no presente estudo estão compilados no APÊNDICE A.

Tanto o incremento radial médio anual (IRMA) quanto o incremento radial acumulado (IRA) apresentaram diferenças significativas entre as árvores amostradas em Volta Redonda e Resende. O IRA entre a região noroeste e Resende apresentou os seguintes valores estatísticos  $t = -2,95, p = 0,008$ ; entre a região sudeste e Resende apresentou  $t = -2,58, p = 0,018$ . O IRMA entre a região noroeste e Resende apresentou  $t = -4,97, p = 0,000$ ; entre a região sudeste e Resende apresentou  $t = -3,90, p = 0,000$ . No entanto, entre as regiões noroeste e sudeste, não houve diferença significativa entre o crescimento das árvores. O IRA apresentou  $t = -0,42, p = 0,679$  e IRMA apresentou  $t = -1,34, p = 0,186$ .

Após análise dos anéis de crescimento, foi observado que do total de 172 amostras obtidas de 86 árvores (35 na região noroeste, 40 na região sudeste e 11 em Resende), 134 amostras radiais apresentaram correlações significativas entre as séries de crescimento (64 na região noroeste, 48 na região sudeste e 22 em Resende), indicando um sinal comum de crescimento.

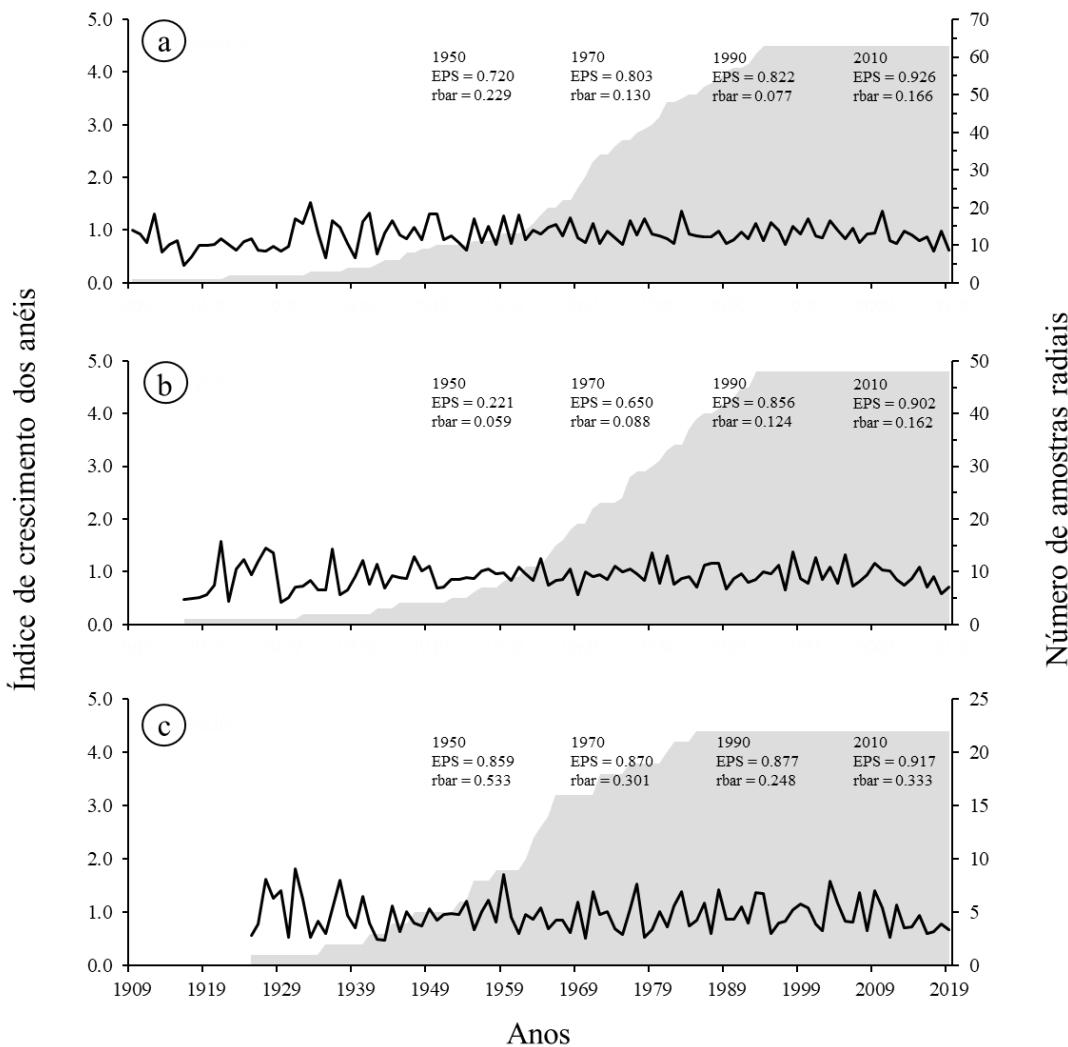
As características estatísticas da cronologia residual, presentes na Tabela 1, mostram que os valores de sensibilidade média foram acima de 0,40 para as amostras dos três locais de estudo. Os valores de intercorrelação das séries foram similares para as árvores de Volta Redonda (regiões noroeste e sudeste) ( $< 0,30$ ), no entanto, Resende apresentou valor superior ( $> 0,50$ ). Os valores obtidos para a variável Rbar variaram entre 0,123 e 0,265. O sinal de expressão da população (EPS) foi alto em todas as regiões e variou de 0,902 a 0,926 entre os locais de estudo.

**Tabela 1.** Características estatísticas da cronologia residual da espécie *T. catappa* nos locais de estudo.

Variáveis	Volta Redonda		Resende
	NO	SE	
<b>Árvores datadas / Amostras radiais</b>	32/64	24/48	11/22
<b>Média largura dos anéis ± DP (mm)</b>	2,80 ± 0,49	2,96 ± 0,40	3,50 ± 0,48
<b>Período</b>	1909-2019 (111 anos)	1916-2019 (104 anos)	1925-2019 (95 anos)
<b>Comprimento médio da série (anos)</b>	50; DP = ±17 (Min = 26; Max = 111)	48; DP = ±16 (Min = 27; Max = 104)	60; DP = ±15 (Min = 35; Max = 95)
<b>Sensibilidade média</b>	0,504	0,519	0,482
<b>Intercorrelação de séries</b>	0,292	0,298	0,535
<b>Rbar ± DP</b>	0,123 ± 0,198	0,132 ± 0,195	0,265 ± 0,145
<b>EPS</b>	0,926	0,902	0,917

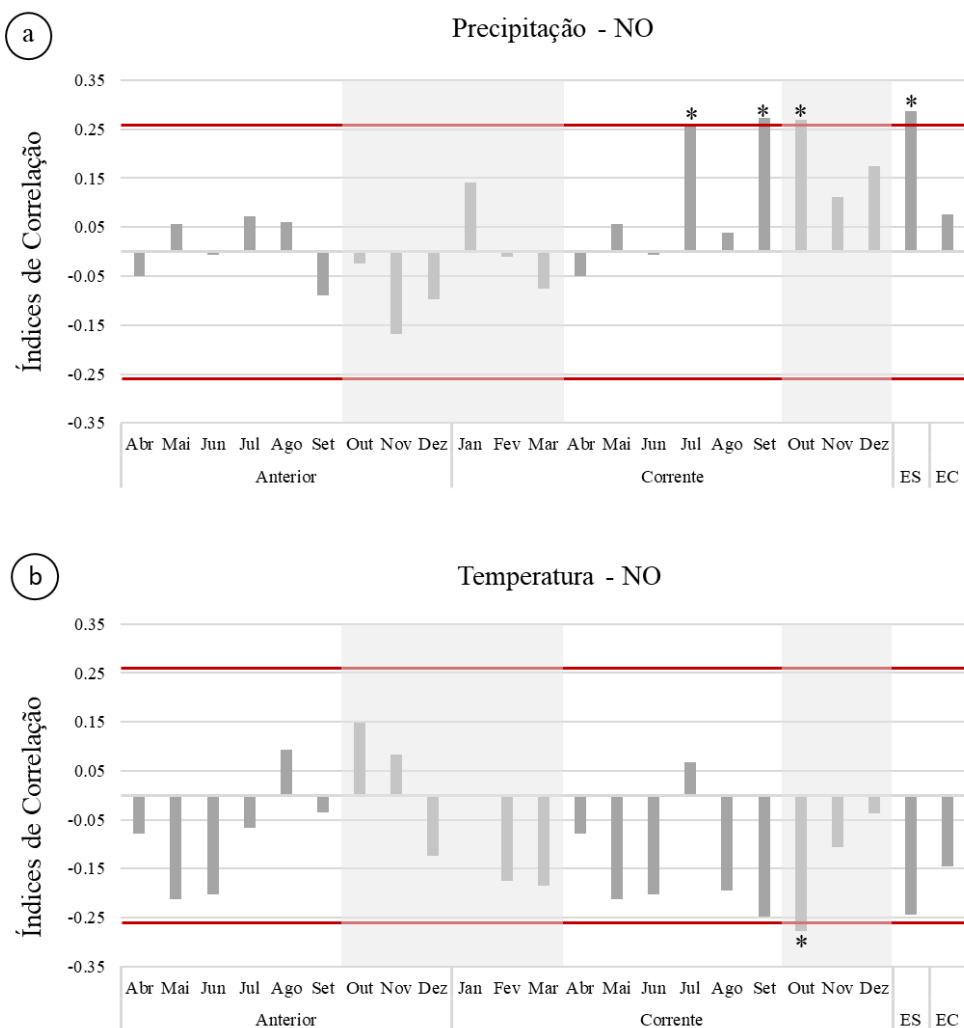
DP: Desvio padrão; EPS: Sinal de expressão da população.

A Figura 4 ilustra os índices de crescimento dos anéis construídos a partir dos valores padronizados (*standard*), bem como o número de amostras utilizadas durante o período analisado (1909 a 2019) nos locais de estudo. Os valores de EPS e Rbar foram destacados em um intervalo de 20 anos (1950, 1970, 1990 e 2010), e verificou-se que, para todos os locais de estudo, o valor de EPS aumentou à medida que o número de amostras radiais aumentou. O coeficiente de correlação (Rbar) foi maior no período de 1950 e menor no ano de 1990 para as cronologias das árvores da região noroeste e Resende; e maior no período de 2010 e menor no período de 1950 para as cronologias das árvores da região sudeste.



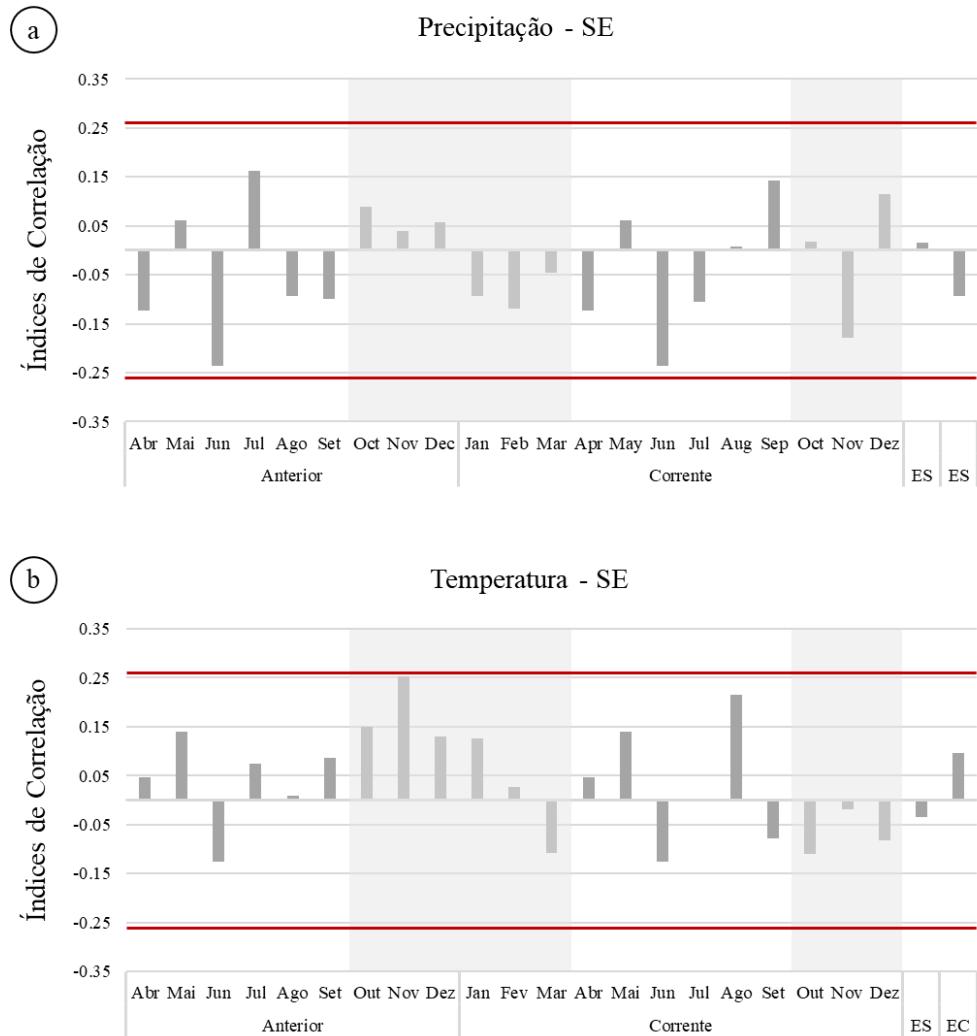
**Figura 4.** Índice de crescimento dos anéis de *T. catappa* nas regiões de estudo (linha preta). (a) noroeste, (b) sudeste e (c) Resende. A área cinza mostra o número de amostras radiais usadas durante o período de análise (1909-2019).

Os índices de correlação da largura dos anéis dos indivíduos analisados na região noroeste (NO) estão representados na Figura 5. Para a variável precipitação, houve correlação positiva significativa no ano corrente, porém, as significâncias ocorreram em dois meses da estação seca (julho e setembro) e em um mês da estação chuvosa (outubro). Ou seja, as árvores da região NO apresentaram uma resposta rápida aos índices de precipitação que ocorreram no ano corrente (Fig. 5a). Para a variável temperatura, houve apenas uma correlação negativa significativa durante o ano corrente, no mês de outubro, que corresponde à estação chuvosa (Fig. 5b). Em outras palavras, conforme a temperatura diminuiu, o crescimento/incremento das árvores aumentou.



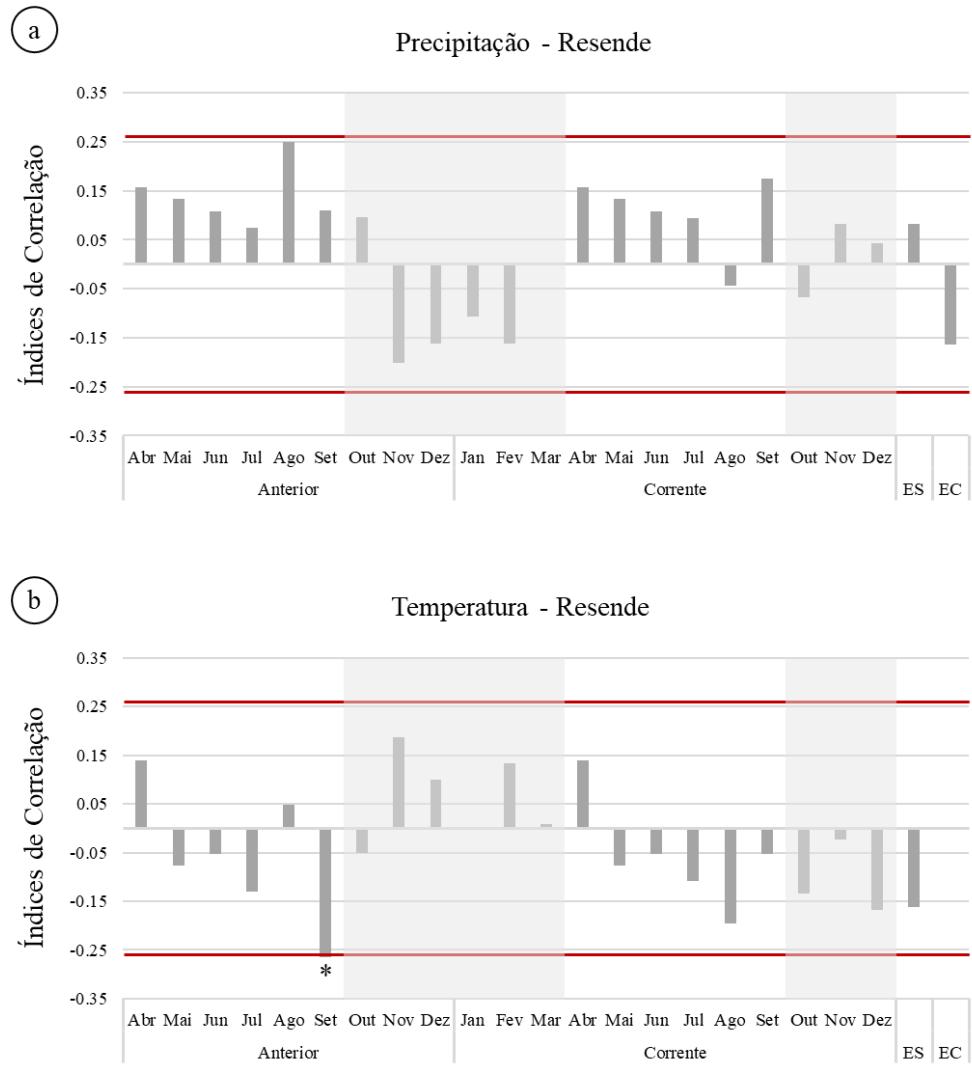
**Figura 5.** Correlações entre a largura dos anéis de *T. catappa* e variáveis climáticas (1961–2018). As barras representam os índices de correlação entre o crescimento da espécie na região noroeste e os índices de precipitação e temperatura. As áreas em cinza claro mostram o período da estação chuvosa. ES: Estação seca; EC: Estação chuvosa. \*Valores de correlação significativos, valor crítico de correlação = 0,259, para  $p < 0,05$ .

Para a região sudeste (SE), os índices de correlação dos indivíduos analisados estão representados na Figura 6. Não houve correlação significativa entre crescimento e variáveis climáticas para as árvores da região SE (Fig. 6a e 6b).



**Figura 6.** Correlações entre a largura dos anéis de *T. catappa* e variáveis climáticas (1961–2018). As barras representam os índices de correlação entre o crescimento da espécie na região sudeste e os índices de precipitação e temperatura. As áreas em cinza claro mostram o período da estação chuvosa. ES: Estação seca; EC: Estação chuvosa. \*Valores de correlação significativos, valor crítico de correlação = 0,259, para  $p < 0,05$ .

Em Resende, os índices de correlação estão representados na Figura 7. Nessa região, não houve correlação significativa para a variável precipitação, no entanto, para a variável temperatura, houve correlação negativa significativa para o mês de setembro, referente ao mês anterior, que corresponde ao mês da estação seca. Isto é, ocorreu um aumento no crescimento enquanto a temperatura diminuiu.



**Figura 7.** Correlações entre a largura dos anéis de *T. catappa* e variáveis climáticas (1961–2018). As barras representam os índices de correlação entre o crescimento da espécie em Resende e os índices de precipitação e temperatura. As áreas em cinza claro mostram o período da estação chuvosa. ES = Estação seca; EC = Estação chuvosa. \*Valores de correlação significativos, valor crítico de correlação = 0,259, para  $p < 0,05$ .

## 4 DISCUSSÃO

Considerando o potencial dendrocronológico da espécie tropical *T. catappa* (CHAGAS, 2009), foi possível descrever uma nova análise dos anéis de crescimento dessa espécie, encontrando diferenças no crescimento e nas respostas às condições climáticas em ambiente sob intensa atividade urbana e siderúrgica. Embora *T. catappa* seja abundantemente encontrada em ambientes antrópicos (RIBEIRO et al., 2020), ainda são poucos os estudos que versam sobre as características do lenho desta espécie (por exemplo, VAN VLIET, 1979; RUWANPATHIRANA, 2014), ou mesmo sobre análise dos anéis (por exemplo, CHAGAS, 2009).

Algumas espécies do gênero *Terminalia* apresentam anéis distintos como *T. bellerica*, *T. myriocarpa*, *T. ivorensis*, *T. superba*, *T. gracilipes*, *T. amazonia* e *T. oblonga* (URBINATI et al., 2003; SINGH et al., 2013; DE RIDDER, 2013; GASPARD et al., 2018; MARCELO-PEÑA et al., 2020). Ao estudar a anatomia da madeira de diversas espécies da família Combretaceae, Van Vliet (1979) descreveu que os anéis de crescimento são distintos para *T. catappa*. Um estudo mais recente de Chagas (2009) relatou descrição semelhante, no entanto detalhou mais algumas características, afirmando que as camadas de crescimento são demarcadas distintamente por uma fina faixa de parênquima marginal, algumas vezes associada ao parênquima axial paratraqueal confluente; pelo espessamento e achatamento radial da parede das fibras, e observou variações do diâmetro dos vasos na transição dos anéis de crescimento. Ou seja, a descrição realizada pelo autor corrobora com as características macroscópicas observadas no presente estudo. Portanto, entende-se que *T. catappa* não apresentou diferenças nas formas de delimitação dos anéis de crescimento em ambiente urbano.

Em estudos dendrocronológicos de espécies tropicais, a dificuldade ao delimitar os anéis de crescimento costuma ser um problema comum (TROUET et al., 2010; DE RIDDER et al., 2013). Por esse motivo, Brienen e Zuidema (2005) recomendam a utilização de discos do tronco a fim de facilitar a verificação da descontinuidade dos anéis nessas espécies. Além disso, a caracterização anatômica auxilia a identificação correta dos anéis durante as mensurações e diminui os erros causados por falsos anéis, que são uma característica comum em espécies tropicais (ARAGÃO et al., 2019), aumentando a precisão das mensurações e favorecendo a construção de cronologias confiáveis (FRITTS, 1976; VAGANOV et al., 2011; BRIENEN et al., 2016; LÓPEZ; VILLALBA, 2020). No presente estudo, ao utilizar amostras em formato de baguetas, o nível de dificuldade para a identificação dos anéis de *T. catappa* foi elevado e demandou imensa atenção durante este processo, uma vez que a espécie apresenta diversas formas de delimitação dos anéis, além de não ter sido possível obter um disco inteiro do tronco pois as amostras foram provenientes da arborização urbana.

A expectativa de vida dessa espécie pode chegar aos 100 anos e apresentar alturas que variam entre 15 e 25 metros em ambiente natural (THOMSON; EVANS, 2006; FLORES, 2002). Ainda que as idades das árvores de cada região estudada tenham sido próximas, as diferenças que ocorreram entre os incrementos das árvores de Volta Redonda e das árvores de Resende podem estar associadas à poluição, uma vez que as árvores que cresceram menos foram as de Volta Redonda. Estudos apontam que os efeitos da poluição atmosférica em árvores urbanas, de maneira geral, afetam os mecanismos fotofisiológicos, provocando alterações nas propriedades ópticas das folhas, no sistema fotossintético e no funcionamento estomático (GRANTZ et al., 2003; PRAJAPATI, 2012; PAOLETTI, 2009), consequentemente, interferem no crescimento em altura e diâmetro das árvores (MARQUES et al., 2019; VASCONCELLOS et al., 2019). Além disso, as frequentes podas de redução, comumente praticadas em árvores urbanas que estão sob linhas de energia (DE CARVALHO MARIA, 2021), podem interferir não só na arquitetura da copa, como também reduzir a área de cobertura foliar, diminuindo a

proporção de folhas e, por consequência, as taxas fotossintéticas. Portanto, a possibilidade de relacionar o crescimento das árvores com os índices de qualidade do ar, como a emissão de material particulado e partículas totais em suspensão, por exemplo, pode ser uma alternativa para compreender melhor a interferência da poluição no crescimento de árvores urbanas.

As cronologias construídas com as 67 árvores de *T. catappa* indicam que o sucesso da datação cruzada entre os indivíduos provavelmente ocorreu por conta de uma variação similar nos padrões de crescimento (STAHLÉ, 1999). Alguns autores, ao trabalharem com espécies do mesmo gênero, encontraram sensibilidades médias que variaram de 0,64 para *T. gracilipe*, em ambiente xerofítico no sudoeste de Madagascar e 0,16 para *T. superba*, em florestas tropicais de planície nas regiões oeste e centro do continente africano, respectivamente (GASPARD, et al. 2018; DE RIDDER et al., 2013). Speer (2010) sugere que 0,20 seja um valor geralmente aceito em séries que são sensíveis o suficiente para a reconstrução do clima. No entanto, para árvores presentes em ambientes urbanos, alguns autores encontraram valores superiores a 0,40 (CHAGAS, 2013; LOCOSSELLI et al., 2019; VASCONCELLOS et at., 2019), valor este considerado tão sensível que pode significar que as datações são complicadas devido à presença frequente de anéis estreitos ou ausentes próximos a anéis mais largos (SPEER, 2010). Contudo, as sensibilidades médias encontradas para as árvores urbanas de *T. catappa* demonstram variabilidade do crescimento ano a ano e um sinal comum altos, inferindo que o crescimento das árvores de Volta Redonda e Resende pode ser influenciado por um fator ambiental, climático ou não climático. O coeficiente de correlação médio para todos os pares possíveis de séries descrito pelo valor de rbar, de maneira geral, foi baixo para as cronologias da espécie *T. catappa* mas similares aos encontrados para árvores urbanas (LOCOSSELLI et al., 2019; VASCONCELLOS et at., 2019). Além disso, as correlações variaram ao longo do crescimento das árvores nos diferentes locais estudados, o que permite avaliar o período em que ocorreram limitações no crescimento (FRITTS, 1976).

Os valores de EPS expressam a qualidade que um conjunto finito de amostras radiais possui para representar a cronologia da população infinita (BURAS, 2017), ou seja, o valor de EPS é influenciado pelo tamanho do conjunto amostral (WIGLEY et al., 1984; SPEER, 2010; MÉRIAN et al., 2013). Segundo Buras (2017), o valor do EPS tem sido mal interpretado em estudos dendrocronológicos, uma vez que a constante utilização arbitrária do limiar teórico acima de 0,85, sugerido por Wigley et al. (1984), refere-se à força do sinal da subamostra, não o tamanho total da amostra. Portanto, nenhum valor específico do EPS pode garantir que a cronologia dos anéis de crescimento seja adequada para reconstruções climáticas (BRIFFA; JONES, 1990; BURAS, 2017).

As relações entre clima e crescimento também podem ser moduladas por fatores não climáticos, incluindo os que estão presentes nos microssítios (FANG et al., 2015). As áreas urbanas podem desenvolver um microclima diferenciado devido a presença de inúmeras fontes emissoras de poluentes, tanto veiculares quanto industriais, que contribuem para o excesso de calor (KUKARSKIH et al., 2022). Além disso, o material particulado (MP), proveniente dessas emissões, também pode afetar o clima local e intensificar os efeitos de ilha de calor e inversão térmica, alterando a maneira como a radiação é transmitida pela atmosfera (VALVERDE et a., 2020; KUKARSKIH et al., 2022; ZHANG et al., 2022). Vale ressaltar que a retenção da poluição ocorre em função do tamanho urbano, da estabilidade atmosférica e, principalmente, da intensidade e fluxo dos ventos (TAKEBAYASHI; SENOO, 2018; YUN et al., 2020; ABBASSI et al., 2022), sendo estes considerados como o principal mecanismo que resulta em maior deposição de partículas nas árvores (CHEN et al., 2015). Paralelamente a isso, a vegetação que compõe a arborização urbana está sujeita a maior estresse e pode sofrer alterações em sua estrutura (RAI, 2016), como nos parâmetros morfológicos ou anatômicos foliares (ALVES et al., 2008; COSTA et al., 2015), nos processos metabólicos celulares (SYTAR et al., 2013) nos períodos de atividade cambial e dormência (IQBAL et al. 2010a;

IQBAL et al. 2010b; VASCONCELLOS et al., 2017) ou ainda, na anatomia do xilema e incremento radial (LEONELLI et al. 2012; CHAGAS, 2013; PRETZSCH et al., 2017; VASCONCELLOS et al., 2019; VASCONCELLOS; CALLADO, 2020). Dessa maneira, a tarefa de interpretar reconstruções dendroclimáticas, por exemplo, pode ser auxiliada pela investigação das influências de fontes não climáticas (FANG et al., 2015).

Diferentes respostas foram observadas ao relacionar o crescimento de *T. catappa* com as variáveis climáticas nos locais de estudo. Considerando que a fonte de dados climáticos de precipitação e temperatura foi a mesma, sugere-se que fatores relacionados à poluição atmosférica podem interferir no crescimento desta espécie em ambiente urbano. Além disso, é possível inferir que a sensibilidade da espécie ao clima foi menor em Resende, uma vez que o município está distante do centro urbano-industrial de Volta Redonda e, por esse motivo, não recebe demasiada influência da poluição proveniente deste local em específico. No entanto, ao avaliar o comportamento da espécie em função do clima entre as duas regiões de Volta Redonda (NO e SE), as árvores da região noroeste apresentaram maior sensibilidade aos índices climáticos, principalmente para as taxas de precipitação. Mesmo sendo próximas, as árvores da região sudeste não expressaram correlação significativa para os índices de precipitação e temperatura, ou seja, o crescimento das árvores nesta região não possui dependência pelo fator climático. Tal fato poderia ser explicado pela possível interferência dos ventos ao longo do ano. As árvores da região sudeste podem ter recebido menos influência da poluição urbana, principalmente industrial, visto que a direção predominante do vento em Volta Redonda foi de sudeste para noroeste, de acordo com o diagrama da rosa dos ventos da região, construído com os dados disponibilizados pelo INEA, entre o período de 2001 a 2018. Gioda et al., (2004), ao avaliarem a qualidade do ar na cidade de Volta Redonda entre alguns períodos dos anos de 1995, 1996 e 1999, observaram que a direção do vento foi de leste a oeste, portanto os poluentes atmosféricos seriam convergidos de leste a oeste. Os mesmos autores ainda constataram que o gradiente de concentração de partículas totais em suspensão (PTS) foi menor a barlavento da indústria siderúrgica do que a sotavento, reforçando a hipótese de que as árvores localizadas na região noroeste estariam recebendo maior interferência de poluição atmosférica.

O comportamento sensível das árvores da região noroeste em função da precipitação pode estar relacionado à perda das folhas no período da estação seca. As árvores de *T. catappa* são brevemente decíduas durante esta estação e, em alguns ambientes, podem chegar a perder suas folhas duas vezes por ano (THOMSON; EVANS, 2006). A superfície foliar, por sua vez, funciona como um eficiente dispositivo de deposição de poluentes, pois são partes altamente expostas (RAI, 2016). Os efeitos da poluição atmosférica nas árvores, de maneira geral, estão associados às respostas fisiológicas que provocam alterações nas propriedades ópticas das folhas, no sistema fotossintético e no funcionamento estomático (GRANTZ et al., 2003; PRAJAPATI, 2012; PAOLETTI, 2009), impactando o crescimento em altura e diâmetro das árvores (MARQUES et al., 2019). Nesse sentido, a precipitação possui um papel importante durante o período da estação chuvosa, pois auxilia a remoção dos poluentes depositados nas superfícies foliares, contribuindo para o efetivo crescimento dos indivíduos arbóreos. Portanto, os resultados mais expressivos dos índices de crescimento em relação à precipitação, observados durante a transição da estação seca para a estação chuvosa, podem significar que o crescimento de *T. catappa* ocorreu em resposta à estação chuvosa do ano anterior e que as árvores presentes na região considerada mais afetada pela poluição (NO) podem apresentar dependência por esse fator climático.

## **5 CONCLUSÕES**

A possibilidade de analisar os anéis de crescimento de *T. catappa* colabora para a compreensão de como essa espécie pode se desenvolver no ambiente urbano. O estudo dendrocronológico da espécie indicou sensibilidade aos índices de precipitação e temperatura em área mais exposta à poluição siderúrgica, visto que ocorreram diferenças no crescimento quando comparada com área menos exposta à mesma poluição. A espécie pode ser considerada rústica e tolerante ao ambiente antrópico devido a longevidade dos indivíduos analisados em condições ambientais distintas. Por isso, investigar essa espécie mais profundamente por meio de análises anatômicas do lenho e propriedades hidráulicas do xilema pode favorecer o desenvolvimento de novas interpretações sobre o seu crescimento e adaptação ao ambiente, uma vez que podem sofrer interferências por diversos fatores quando em meio urbano. Portanto, a delimitação dos anéis de crescimento da espécie nessa pesquisa contribui para a realização de estudos dendrocronológicos futuros, ampliando a compreensão do comportamento dessa espécie em diversas escalas regionais.

## **CAPÍTULO II**

**CONCENTRAÇÃO DE METAIS PESADOS NA MADEIRA E NA CASCA DE  
ÁRVORES DA ESPÉCIE *Terminalia catappa* L. EM AMBIENTE URBANO**

## **RESUMO**

As árvores urbanas, por meio de suas estruturas, contribuem para o monitoramento da poluição atmosférica pois podem acumular eficientemente os elementos que estão em suspensão no ar e/ou em deposição no solo. Nesse contexto, os objetivos foram determinar as concentrações dos metais acumulados na madeira e nas cascas da espécie *T. catappa* e avaliar se houve diferença entre as regiões estudadas. Os elementos Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr e Ni foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica com câmara de grafite e os elementos Fe, Mn e Zn foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica com chama. O arsênio foi o elemento que apresentou maiores concentrações no lenho e o chumbo maiores concentrações na casca das árvores da cidade de Volta Redonda. Nesse sentido, os resultados são importantes para inferir a respeito dos níveis passados e atuais de poluição atmosférica.

**Palavras-chave:** dendroquímica, cascas, árvores urbanas.

## **ABSTRACT**

Urban trees, through their structures, contribute to the monitoring of atmospheric pollution as they can efficiently accumulate elements that are suspended in the air and/or deposited on the ground. In this context, the objectives were to determine the concentrations of metals accumulated in the wood and bark of the species *T. catappa* and to assess whether there was a difference between the regions studied. Al, As, Cd, Pb, Cu, Cr, and Ni were quantified by graphite chamber atomic absorption spectrophotometry, and Fe, Mn, and Zn were quantified by flame atomic absorption spectrophotometry. Arsenic was the element that presented the highest concentrations in the wood and the element Pb had the highest concentrations in the bark of trees in the city of Volta Redonda. In this sense, the results are important to infer past and current levels of air pollution.

**Keywords:** dendrochemistry, bark, urban trees.

## 1 INTRODUÇÃO

A poluição atmosférica por material particulado (MP) tornou-se um problema ambiental em alguns países em desenvolvimento (CHEN et al., 2015; ZHANG et al., 2019) e em cidades de países desenvolvidos (NOWAK et al., 2013), causando impacto tanto no clima quanto na saúde humana (AGUDELO-CASTAÑEDA et al., 2017; MA et al., 2019). O material particulado pode apresentar diferentes tamanhos (LUO et al., 2019) e composição química variada, a depender da localização, meteorologia e fonte de origem (FUZZI et al., 2015; JIN et al., 2017; SHIRAIWA et al., 2017). Estudos observaram que metais podem estar contidos nos materiais particulados, apresentando várias frações de tamanho e diferentes capacidades potenciais de transporte (LUO et al., 2011; SCHULZ et al., 2012), atingindo longas distâncias com o vento (COCOZZA et al., 2021). Esses elementos podem ser provenientes de fontes naturais ou emissões antrópicas (PIERANGELI et al. 2004) e uma vez liberados no ambiente, não desaparecem por completo, podem se acumular nos solos, sedimentos e nos organismos vivos (STANKOVIC et al. 2014).

A atividade siderúrgica pode emitir diversos poluentes atmosféricos, dentre eles estão alguns metais como chumbo (Pb), cádmio (Cd), arsênio (As), cromo (Cr) e níquel (Ni), que embora possam ser considerados elementos traço, em termos de volume de emissões, recebem grande atenção devido aos altos riscos de exposição à saúde humana (WANG et al., 2016). No entanto, as emissões pelo tráfego veicular também devem ser consideradas como fontes poluidoras, uma vez que os combustíveis podem apresentar diversos metais como alumínio (Al), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cobre (Cu) (ALMEIDA et al. 2016; ANTUNES et al. 2017) e chumbo (Pb), embora o uso de gasolina sem chumbo, afirmada desde os anos 90, pareça ter diminuído as concentrações de Pb em sua composição (GRATANI et al., 2008). Nesse cenário, as árvores urbanas podem acumular eficientemente esses elementos em suspensão na atmosfera e/ou em deposição no solo, por meio de suas estruturas (COCOZZA et al., 2016) e assim contribuir para o monitoramento da poluição, representando a evolução temporal da disponibilidade dos elementos no ambiente em que se desenvolvem (DOUCET et al., 2012).

O monitoramento do material particulado, em tempo real, costuma apresentar algumas falhas devido às limitações físicas, técnicas e econômicas (BELKACEM et al., 2021). De acordo com Lanzaco et al. (2019), dados de redes de monitoramento, de curto prazo, referentes à qualidade do ar são mais difundidos em áreas urbanas na América do Norte e Europa, por outro lado, são escassos na Ásia, África, Oceania e América do Sul. Por esse motivo, com o intuito de complementar as medições de poluições atmosféricas por registros instrumentais, alguns métodos de biomonitoramento são utilizados (MUÑOZ et al., 2019). O termo biomonitoramento pode ser considerado como um método experimental indireto, em que é possível verificar a existência de poluentes em determinada área, por meio da utilização de organismos vivos, que podem acumular elementos tóxicos ou podem responder ao estresse em que estão submetidos por modificações em seus ciclos vitais (CARRERAS; PIGNATA, 2002). A utilização de plantas superiores para fins de monitoramento do ar tem se tornado cada vez mais comum, uma vez que as principais vantagens incluem a maior disponibilidade do material biológico, a simplicidade de identificação das espécies e ubiquidade de alguns gêneros, possibilitando a cobertura de grandes áreas (RAI et al., 2016).

As árvores registram e incorporam no próprio lenho impressões do meio abiótico, refletindo as condições ambientais ocorridas ao longo de suas vidas (TOMAZELLO et al., 2001). O estudo que pode ser utilizado para investigar a história de contaminação e o transporte de elementos químicos no ambiente é chamado dendroquímica (LIU et al., 2018). Desde que Lepp (1975) apresentou o conceito de dendroquímica, diversos estudos têm ocorrido com o

intuito de reconstruir o histórico de poluição de determinado local (VIVES et al., 2006; MEDEIROS et al., 2008; ODABASI et al., 2016; PERONE et al., 2018; VASCONCELLOS et al., 2019; ALTERIO et al., 2020; LOCOSSELLI et al., 2020; COCOZZA et al., 2021; BALLIKAYA et al., 2022). O biomonitoramento utilizando casca de árvores também tem sido amplamente aplicado como ferramenta para identificar e avaliar a distribuição espacial da concentração de metais no ambiente (SUZUKI, 2006; CATINON et al., 2009; COCOZZA et al., 2016; DRAVA et al., 2016; MOREIRA et al., 2016; ODABASSI et al., 2016; BRIGNOLE et al., 2018; MARTIN et al. 2018; AUSTRUY et al. 2019; SOUZA et al., 2019; CHAPARRO et al., 2020; LOCOSSELLI et al., 2020). Além disso, é um estudo que apresenta praticidade pela disponibilidade de espécies arbóreas, não demanda demasiado custo durante a amostragem e apresenta facilidade no preparo das amostras (SAWIDIS et al., 2011; MARĆ et al., 2015).

Até o presente momento, não se sabe se a espécie *T. catappa* é capaz de acumular metais provenientes de atividades antrópicas. Portanto os objetivos foram determinar as concentrações dos metais acumulados na madeira e nas cascas, em cada região de estudo, e avaliar se houve diferença entre as regiões, tanto para a concentração dos metais acumulados na madeira quanto para os acumulados na casca. Sabendo que a atividade siderúrgica e o tráfego veicular contribuem para as emissões de poluentes atmosféricos na cidade de Volta Redonda, espera-se que a espécie estudada acumule metais considerados prejudiciais à saúde humana e contribua para o monitoramento desses elementos no espaço e no tempo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Após análise dos anéis de crescimento, uma amostra radial de cada árvore foi selecionada para a realização das análises químicas, totalizando a seleção de 45 amostras radiais, 20 em cada região (NO e SE) e 5 em Resende. Para a análise química das cascas, foram coletadas amostras de aproximadamente 2,00 x 2,00 cm em cada árvore, totalizando 45 amostras, 20 em cada região (NO e SE) e 5 em Resende.

As amostras radiais foram separadas em três períodos do crescimento: período próximo à medula (PI), período intermediário (PII) e período próximo ao câmbio (PIII). Todas as amostras (madeira e casca) foram reduzidas a pó por meio de um moedor comum. Cada amostra moída continha pelo menos 0,5 g. Com o intuito de determinar a quantidade dos metais pesados, primeiramente, as amostras foram submetidas ao método de digestão, adicionando HNO<sub>3</sub> concentrado (2.0 mL) e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentrado (1.0 mL) para cada amostra presente nos tubos de ensaio. As soluções foram agitadas em vórtex e deixados em temperatura ambiente por 24 h e, em seguida, utilizando blocos aquecedores, as amostras foram aquecidas a 60 °C por 1 h, e gradualmente a temperatura foi elevada para 80 °C, 100 °C, 120 °C até atingir os 150 °C, permanecendo nessa temperatura até que a solução se tornasse límpida e incolor. Após resfriar até temperatura ambiente, 10.0 mL de solução de matriz HNO<sub>3</sub> (1.5 mL de ácido em 1000 mL de água destilada) foi adicionada às amostras digeridas e, na sequência, foram agitadas.

Os metais Alumínio, Arsênio, Cádmio, Chumbo, Cobre, Cromo e Níquel foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica eletrotérmica (UNICAM 939 AA Spectrometer) acoplado com câmara de grafite (UNICAM GF 90 Furnace) e os elementos Ferro, Manganês e Zinco foram quantificados por espectrofotometria de absorção atômica com chama (Thermo Scientific iCE 3000 Series AA Spectrometer). Algumas amostras precisaram ser diluídas para facilitar a determinação dos elementos. Ao iniciar cada quantificação, calibrações foram realizadas utilizando padrões aquosos preparados em 1,0 M HNO<sub>3</sub>. Todas as curvas de calibração foram baseadas em pelo menos cinco concentrações padrão. As concentrações finais foram expressas em ppb (parte por bilhão) ou ppm (parte por milhão) e posteriormente transformadas em mg/kg.

Antes da realização das análises estatísticas, todos os resultados quantitativos foram testados para normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk. Os valores que não seguiram uma distribuição normal foram submetidos à transformação logarítmica. Os valores que apresentaram distribuição normal foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA), seguidos pelo teste de Tukey, quando foi necessária a comparação entre mais de dois grupos. Os valores que não apresentaram distribuição normal, mesmo depois da transformação logarítmica, foram analisados por meio do teste Kruskal-Wallis, seguidos pelo teste de Mann-Whitney e o teste post-hoc de Dunn, quando foi necessária a comparação entre mais de dois grupos. Além disso, uma análise de regressão foi realizada entre as concentrações de cada elemento acumulado na casca e as concentrações de cada elemento acumulado na madeira. Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software PAST 4.10 (HAMMER, 2001).

### 3 RESULTADOS

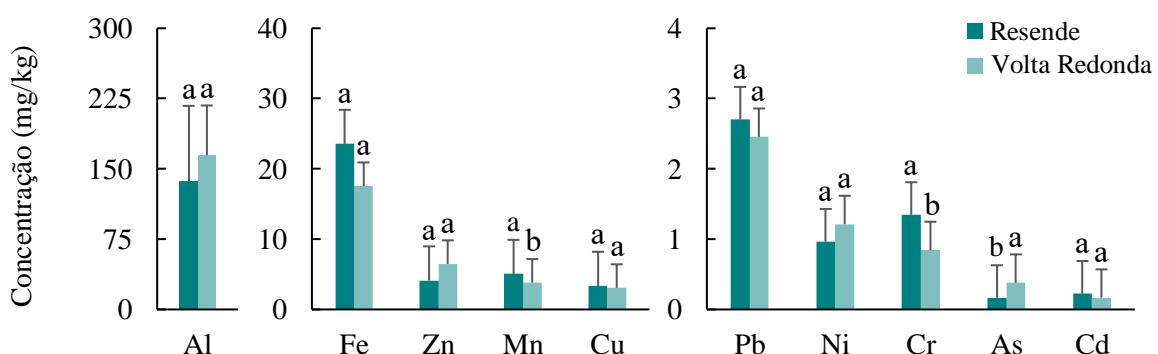
As concentrações dos elementos alumínio, ferro, zinco, manganês, cobre, chumbo, níquel, cromo, arsênio e cádmio foram determinadas nas amostras de madeira e cascas da espécie *T. catappa*, em cada área de estudo. Além disso, variaram tanto entre os materiais (madeira e casca) quanto entre as áreas de estudo (Resende, Volta Redonda e regiões NO e SE).

A princípio, uma análise de regressão foi realizada com o intuito de verificar o efeito da concentração dos elementos acumulados na casca sobre a concentração dos elementos acumulados na madeira. Os valores de  $R^2$  foram baixos e, portanto, as concentrações dos elementos na madeira sofrem pouquíssima, ou quase nenhuma, influência das concentrações dos elementos nas cascas (Tabela 2).

**Tabela 2.** Análise de regressão entre as concentrações de casca e madeira.

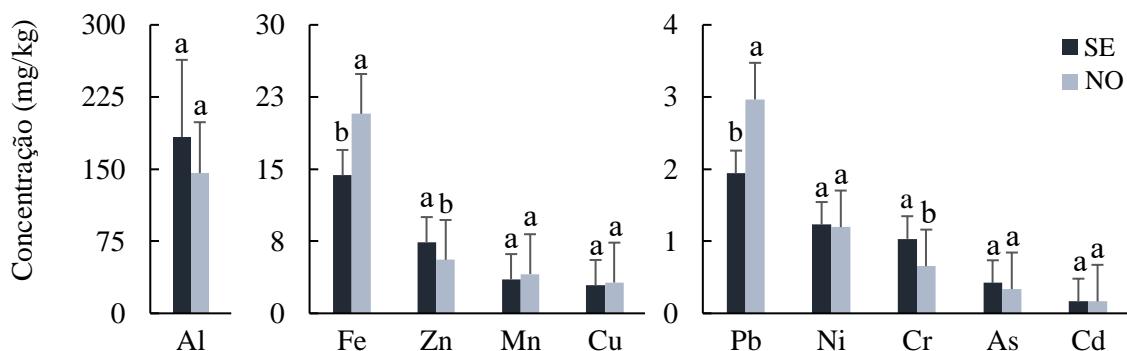
Valores	Relação dos elementos entre casca e madeira									
	Al	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	Ni	Cr	As	Cd
<b>R<sup>2</sup></b>	0,00	0,04	0,01	0,00	0,05	0,01	0,13	0,01	0,02	0,15
<b>p-valor</b>	0,74	0,22	0,62	0,88	0,13	0,51	0,02	0,64	0,43	0,01

Foram observadas algumas diferenças significativas nas concentrações médias dos elementos acumulados na madeira, quando comparadas entre os locais Resende e Volta Redonda. Os elementos manganês, cromo e arsênio se diferenciaram significativamente entre os locais, no entanto, somente o arsênio apresentou concentração média superior para o local Volta Redonda. Ainda é interessante destacar que os elementos alumínio, zinco e níquel apresentaram concentrações médias superiores em Volta Redonda (Figura 8).



**Figura 8.** Concentração média dos elementos acumulados na madeira da espécie *T. catappa* em Resende e Volta Redonda. Letras diferentes representam diferença estatística em um nível de significância de 0,05.

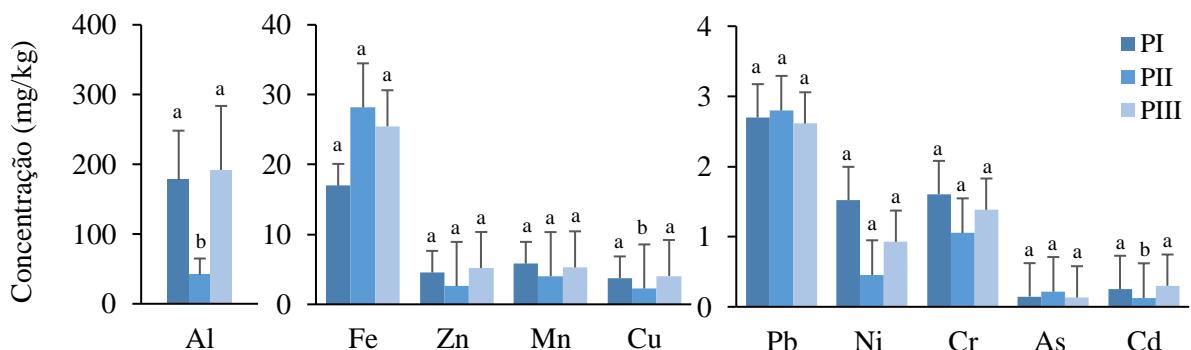
As concentrações médias dos elementos acumulados na madeira entre as regiões sudeste (SE) e noroeste (NO) foram significativas somente para os elementos ferro, zinco, chumbo e cromo. Dentre eles, os elementos ferro e chumbo foram maiores na região noroeste e os elementos zinco e cromo na região sudeste (Figura 9).



**Figura 9.** Concentração média dos elementos acumulados na madeira da espécie *T. catappa* nas regiões sudeste (SE) e noroeste (NO), em Volta Redonda. Letras diferentes representam diferença estatística em um nível de significância de 0,05.

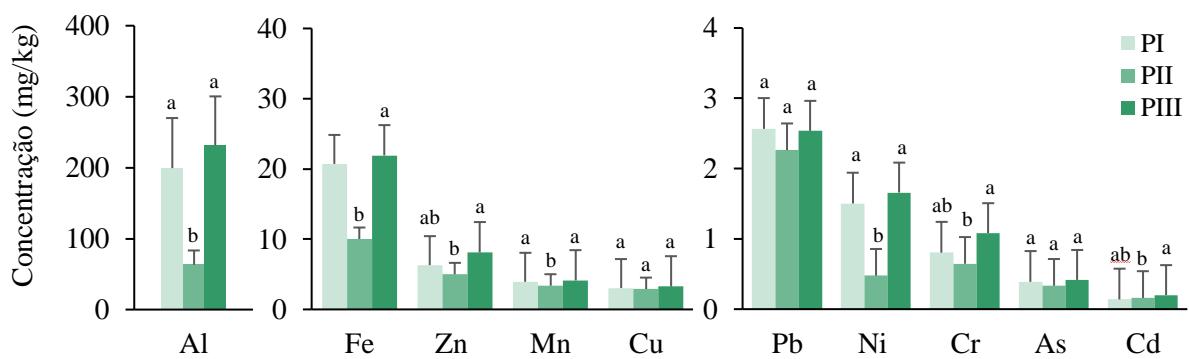
Ainda foram realizadas comparações entre os períodos de crescimento: período próximo à medula (PI), período intermediário (PII) e período próximo ao câmbio (PIII), em cada área de estudo.

Para o local Resende, os elementos alumínio, cobre e cádmio diferiram estatisticamente entre os períodos. No entanto, as maiores concentrações desses elementos ocorreram nos períodos PI e PIII. Esse padrão também foi observado nas concentrações médias de outros elementos, como o zinco, manganês, níquel e cromo (Figura 10).



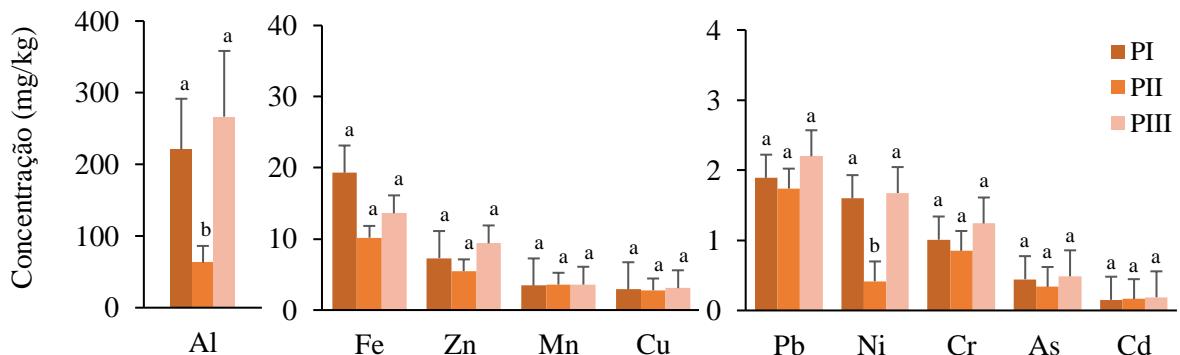
**Figura 10.** Concentração média dos elementos acumulados na madeira de *T. catappa* em diferentes períodos do crescimento em Resende. PI = 1949-1972; PII = 1973-1995; PIII = 1996-2018.

Em Volta Redonda, as concentrações médias dos elementos alumínio, ferro, zinco, manganês, níquel, cromo e cádmio apresentaram diferenças significativas entre os períodos. As maiores concentrações ocorreram nos períodos PI e PIII. O mesmo padrão também foi observado nos demais elementos (Figura 11).



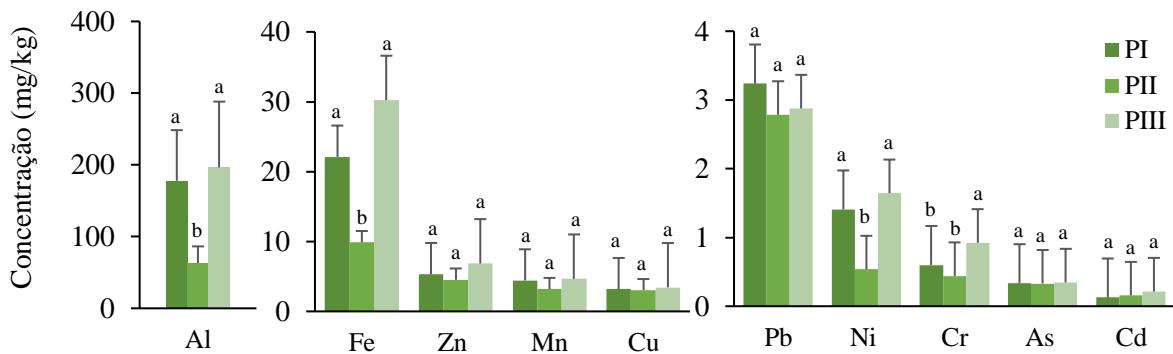
**Figura 11.** Concentração média dos elementos acumulados na madeira de *T. catappa* em diferentes períodos do crescimento em Volta Redonda. PI = 1962-1978; PII = 1979-1996; PIII = 1997-2018.

Na região sudeste, apenas o alumínio e o níquel apresentaram diferenças significativas entre os períodos de crescimento e apresentaram maiores concentrações nos períodos PI e PIII. O mesmo padrão também foi observado nos demais elementos, exceto para os elementos manganês e cádmio (Figura 12).



**Figura 12.** Concentração média dos elementos acumulados na madeira de *T. catappa* em diferentes períodos do crescimento na região sudeste de Volta Redonda. PI = 1964-1979; PII = 1980-1997; PIII = 1998-2018.

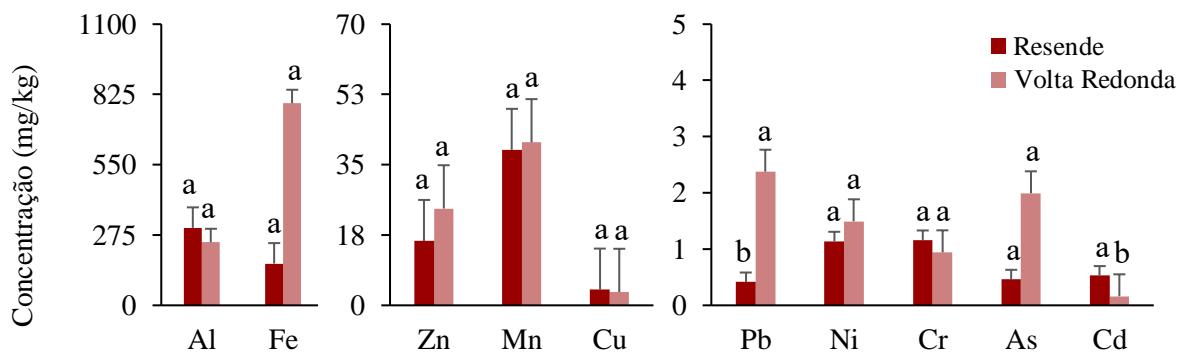
Na região noroeste, as concentrações médias dos elementos alumínio, ferro, níquel e cromo apresentaram diferenças significativas. Além desses, os demais elementos apresentaram o mesmo comportamento entre os períodos do crescimento, maiores concentrações em PI e PIII, exceto nos elementos cobre, arsênio e cádmio que apresentaram concentrações médias similares entre os períodos (Figura 13).



**Figura 13.** Concentração média dos elementos acumulados na madeira de *T. catappa* em diferentes períodos do crescimento na região noroeste de Volta Redonda. PI = 1961-1977; PII = 1978-1994; PIII = 1995-2018.

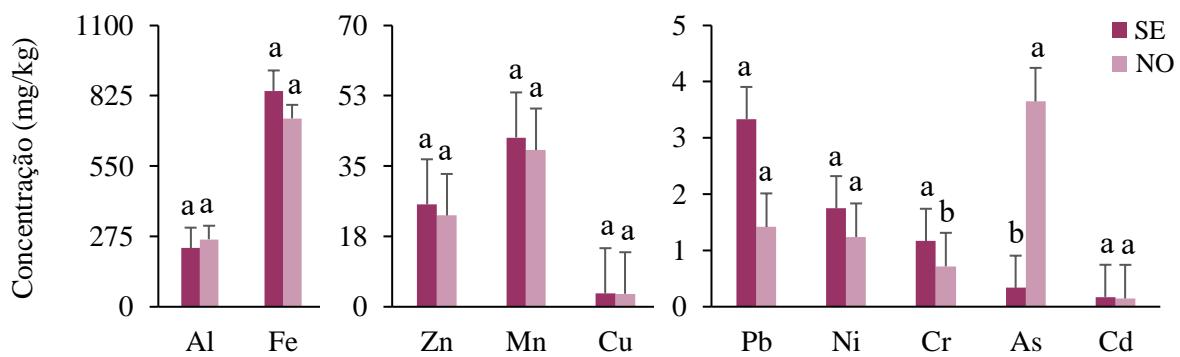
As concentrações médias dos elementos acumulados nas cascas também foram comparadas entre os locais (Resende e Volta Redonda) e entre as regiões (sudeste e noroeste).

Entre os locais Resende e Volta Redonda, somente os elementos chumbo e cádmio apresentaram diferenças significativas. O chumbo apresentou maiores concentrações em Volta Redonda e o cádmio em Resende. Os demais elementos como ferro, zinco, manganês, níquel e arsênio, apresentaram maiores concentrações em Volta Redonda. O alumínio, cobre, cromo e cádmio apresentaram maiores concentrações em Resende.



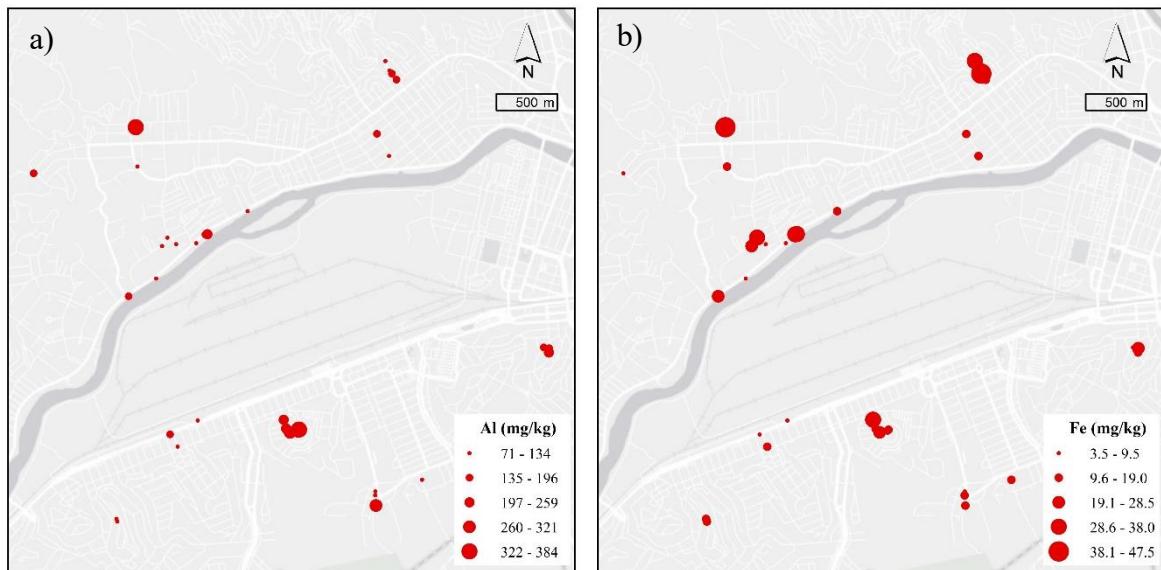
**Figura 14.** Concentração média dos elementos acumulados nas cascas da espécie *T. catappa* em Resende e Volta Redonda. Letras diferentes representam diferença estatística em um nível de significância de 0,05.

Entre as regiões sudeste (SE) e noroeste (NO), apenas o cromo e o arsênio apresentaram diferenças significativas. O cromo apresentou maiores concentrações na região sudeste e o arsênio na região noroeste. Os demais elementos como ferro, zinco, manganês, cobre, chumbo, níquel e cádmio, apresentaram maiores concentrações na região sudeste. Somente o alumínio apresentou maior concentração na região noroeste.

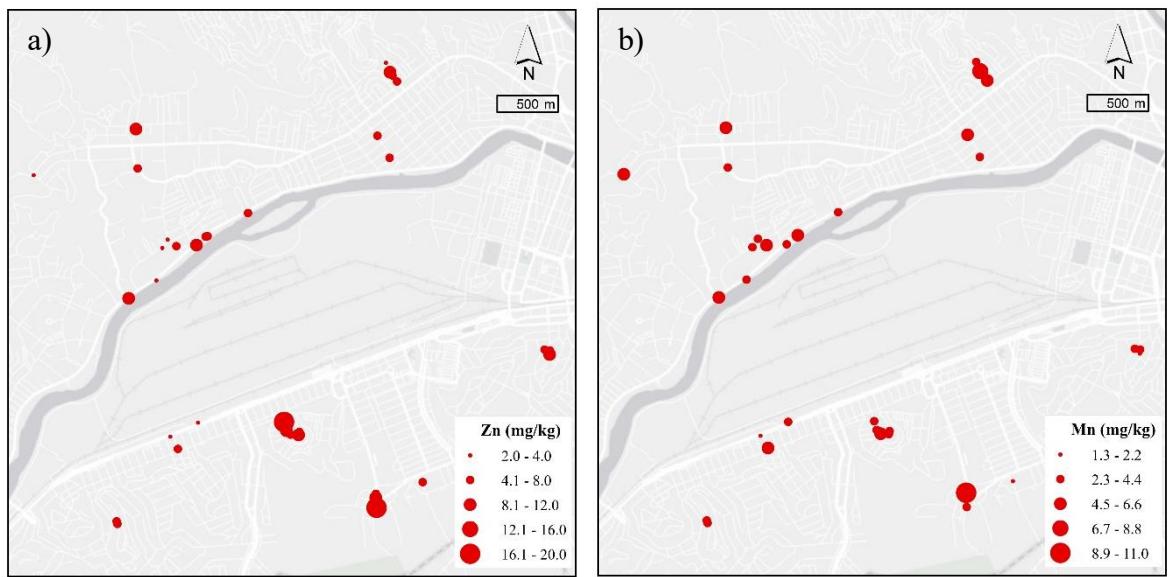


**Figura 15.** Concentração dos elementos acumulados nas cascas da espécie *T. catappa* nas regiões sudeste e noroeste, em Volta Redonda. Letras diferentes representam diferença estatística em um nível de significância de 0,05.

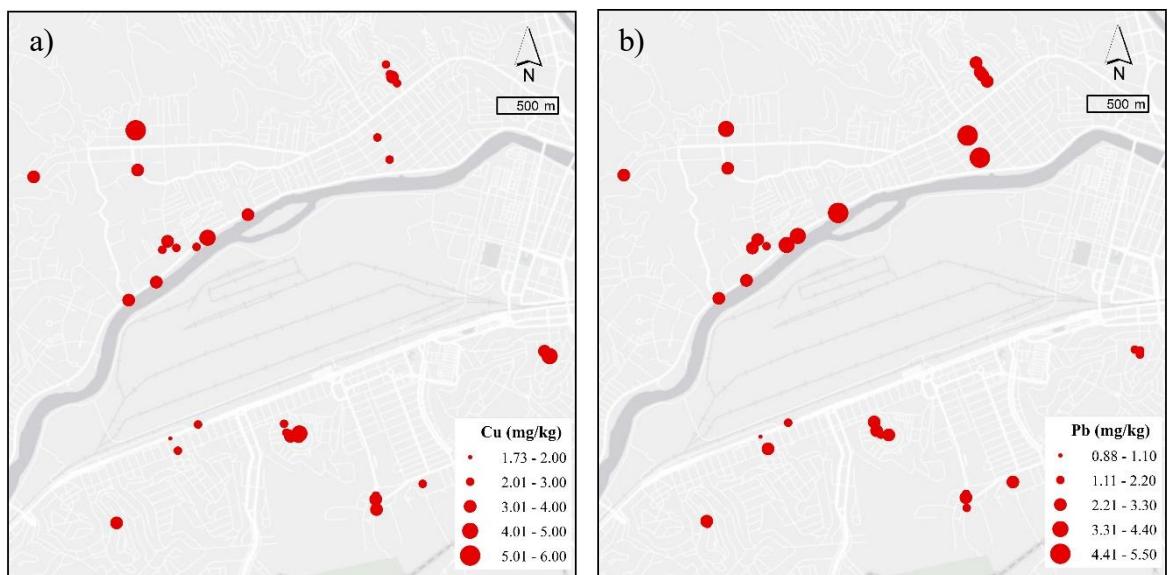
A distribuição espacial dos elementos acumulados na madeira da espécie *T. catappa* pode ser observada entre as regiões de Volta Redonda nos mapas a seguir.



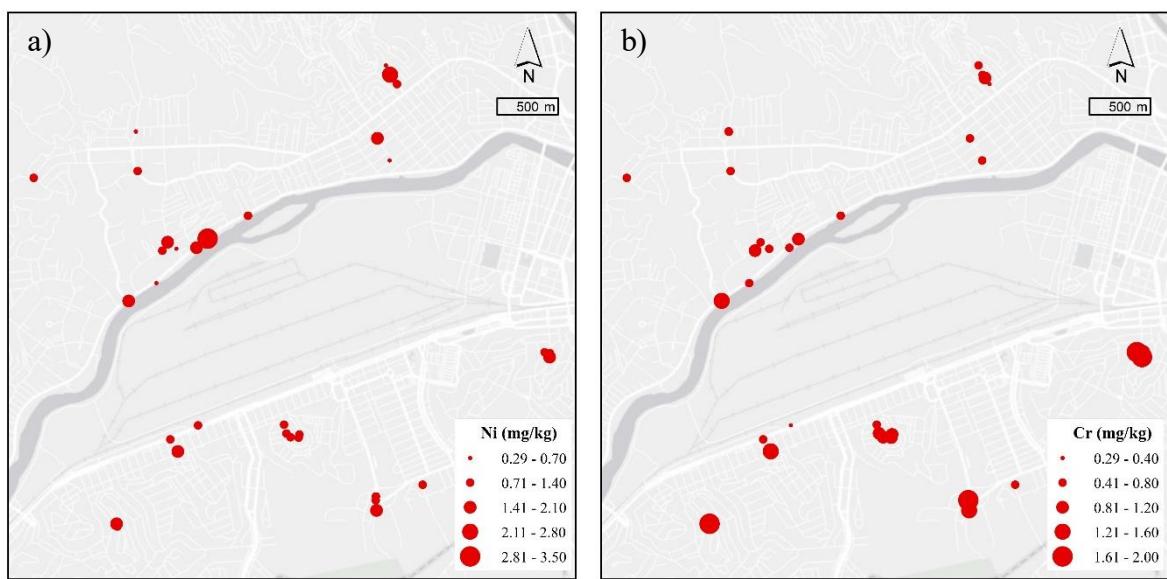
**Figura 16.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. a) alumínio; b) ferro.



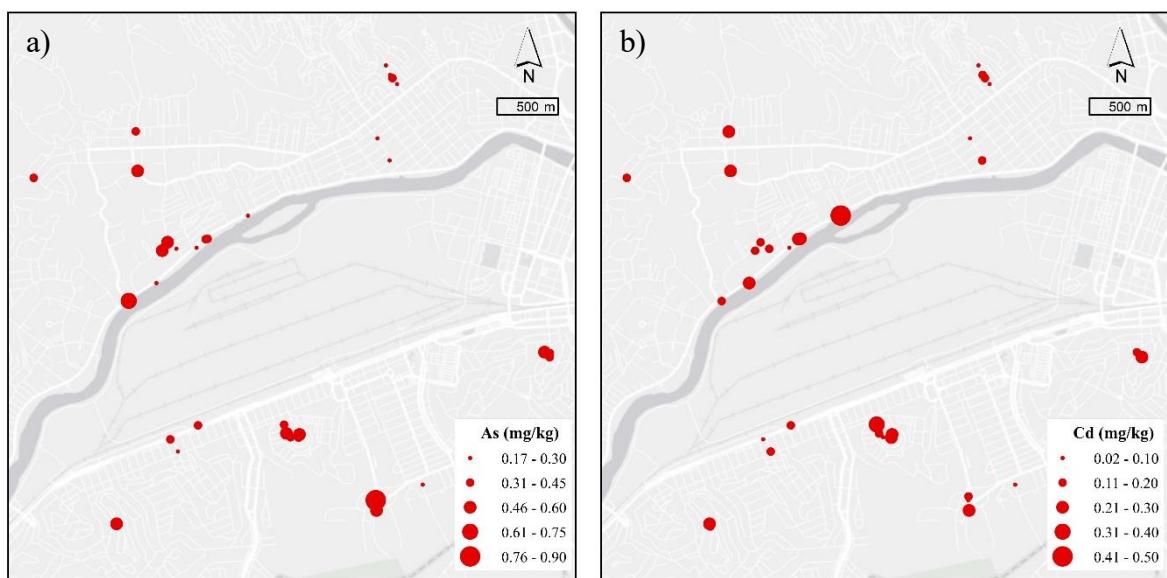
**Figura 17.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. a) zinco; b) manganês.



**Figura 18.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. a) cobre; b) chumbo.

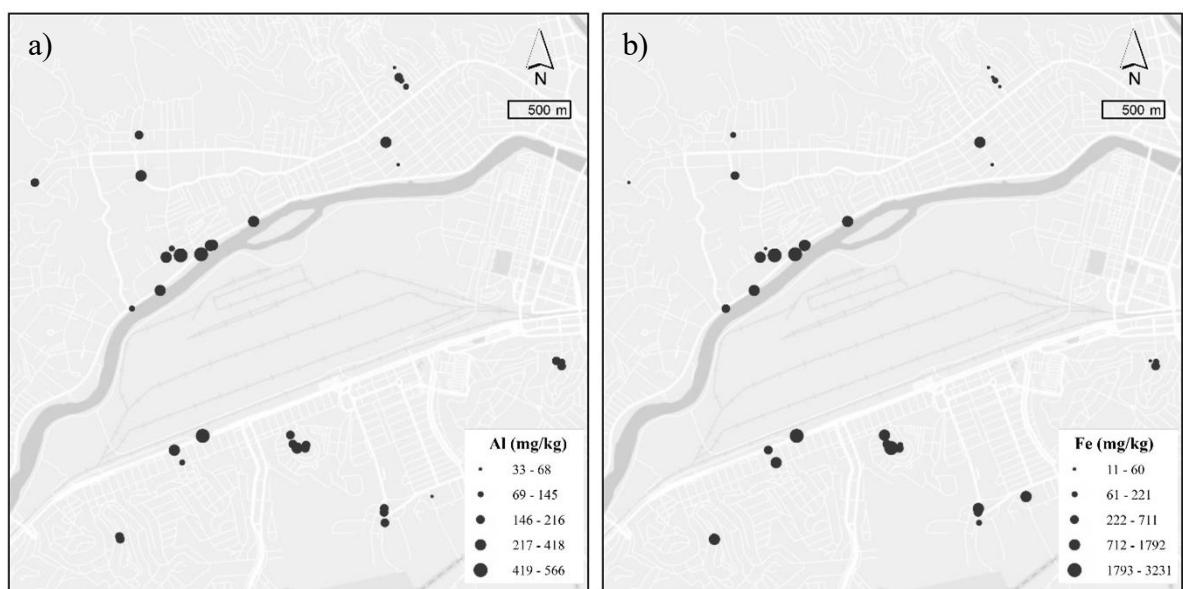


**Figura 19.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. a) níquel; b) cromo.

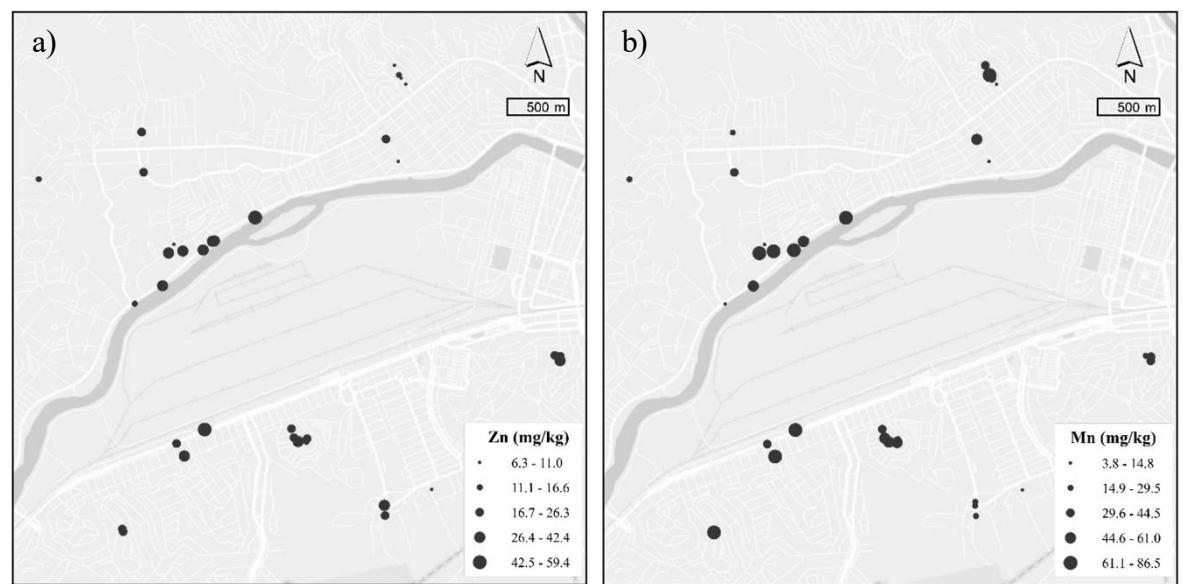


**Figura 20.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na madeira. a) arsênio; b) cádmio.

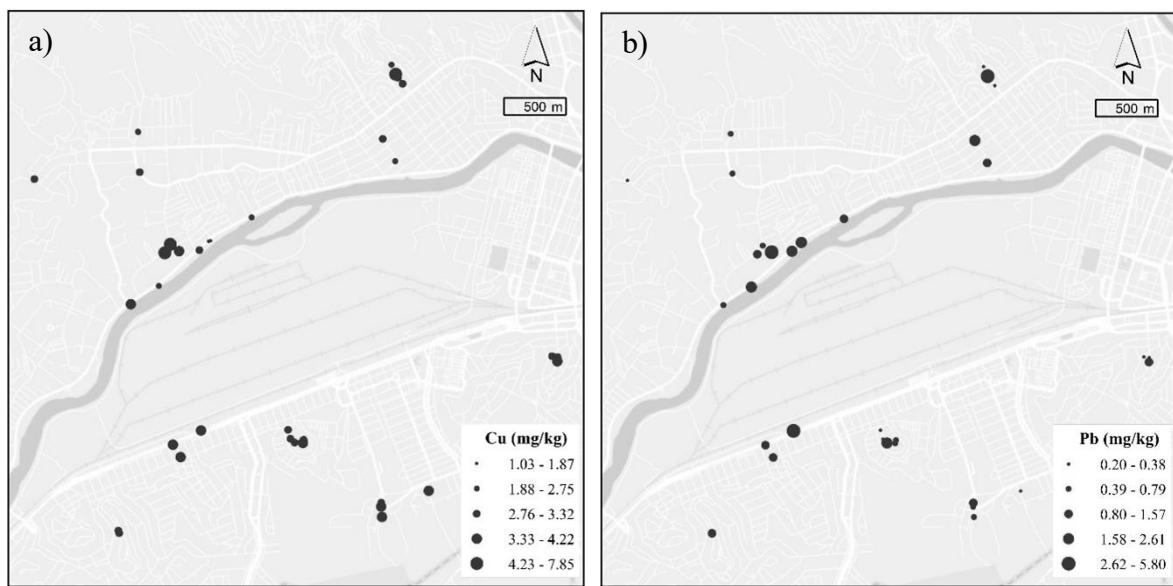
A distribuição espacial dos elementos acumulados nas cascas da espécie *T. catappa* pode ser observada entre as regiões de Volta Redonda nos mapas a seguir.



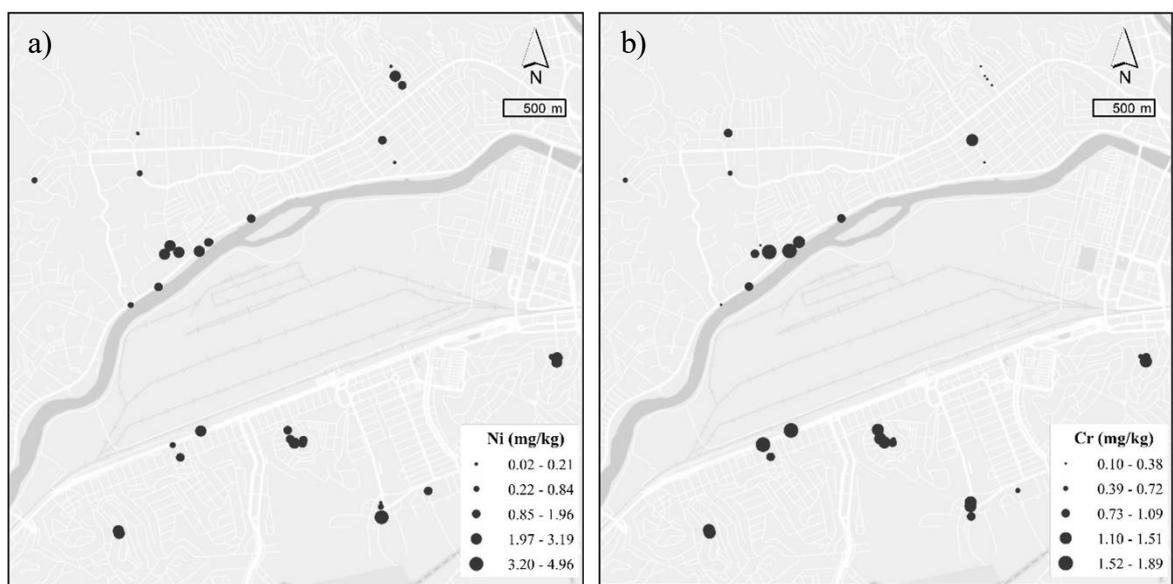
**Figura 21.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. a) alumínio; b) ferro.



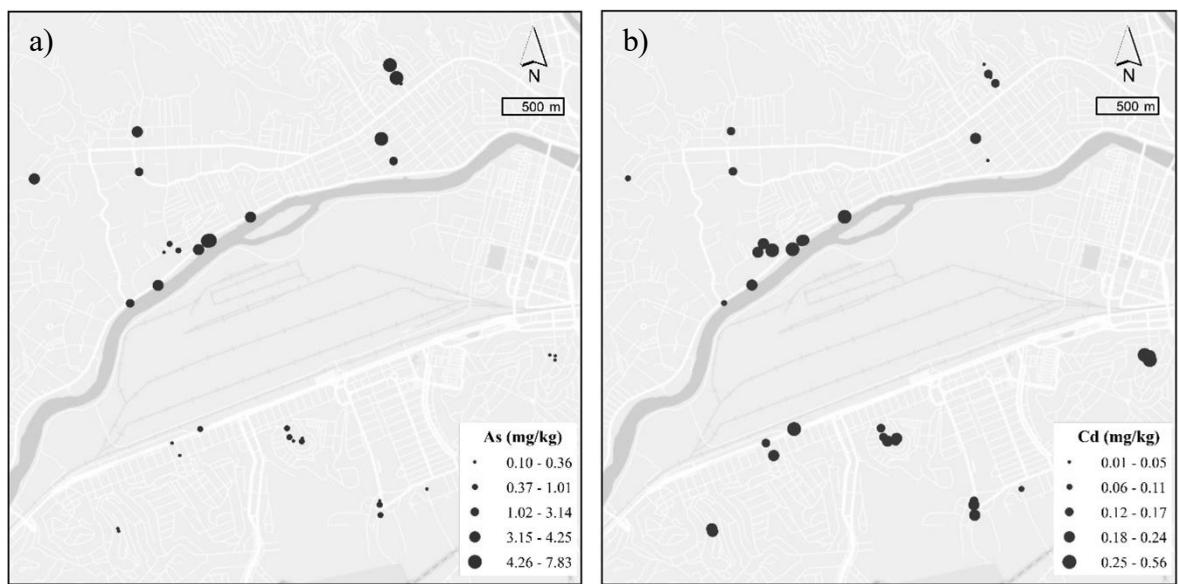
**Figura 22.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. a) zinco; b) manganês.



**Figura 23.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. a) cobre; b) chumbo.



**Figura 24.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. a) níquel; b) cromo.



**Figura 25.** Distribuição espacial das concentrações médias (em mg/kg) dos elementos analisados na casca. a) arsênio; b) cádmio.

## 4 DISCUSSÃO

A análise de regressão realizada entre o acúmulo de metais presentes na casca e na madeira evidenciou que não existe relação entre essas duas estruturas. Ou seja, a concentração dos metais acumulados na casca não influencia a concentração dos metais acumulados na madeira. A ausência dessa relação pode ser explicada pela compreensão das vias de absorção e fixação desses elementos, atualmente citados na literatura. Pelas raízes: os elementos que estão disponíveis no solo, se movem em direção à raiz tanto por fluxo de massa, resultante da transpiração, quanto por difusão, em favor do gradiente de concentração (TAIZ; ZEIGER, 2013). Os mesmos autores ainda explicam que, a partir do fluxo de massa, os elementos são carregados pela água, que se move do solo até as raízes, e a quantidade de elementos depende da taxa de fluxo de água, que por sua vez depende das taxas de transpiração e dos níveis de nutrientes na solução do solo. Após a adsorção na superfície da raiz, os metais penetram passivamente nas raízes e são transportados através do xilema (SHAHID et al., 2014); Pelas folhas: possivelmente podem ser pela adsorção e internalização via cutícula (LI et al., 2017; XU et al., 2019) e pela penetração de metais através dos poros estomáticos no interior das folhas (SAUMEL et al., 2012; LARUE et al., 2014). Uma vez dentro das células, podem ser transportados apoplásticamente ou simplasticamente (RICO et al., 2011); e pela casca: os poluentes atmosféricos, principalmente as partículas em suspensão, podem ser acumulados nas superfícies mais externas das cascas (CATINON et al., 2011) e características como a morfologia, podem favorecer o acúmulo de poluentes (SGRIGNA et al., 2020). No entanto, os mecanismos e as características físico-químicas da deposição dos elementos de origem atmosférica e seu acúmulo nas cascas ainda são pouco compreendidos (CATINON et al., 2009). Um estudo comparou o acúmulo de elementos na camada interna da casca da espécie *Fraxinus excelsior* L. com os da camada externa e foi observado que os dois processos são diferentes e complexos, cujos fatores limitantes e escalas de tempo não eram os mesmos (CATINON et al., 2008). Portanto, tanto as raízes quanto as folhas contribuem para o acúmulo dos elementos no lenho. No entanto, ainda não se pode afirmar que os elementos acumulados nas cascas são translocados para o xilema.

Todos os elementos analisados neste estudo estão associados à vários processos na siderurgia (TSAI et al., 2007; WANG et al., 2015). Ao comparar as concentrações dos elementos acumulados na madeira, o As foi o elemento que apresentou maiores concentrações na cidade de Volta Redonda. O arsênio pode ser proveniente de fontes naturais e antrópicas, sendo encontrado na crosta terrestre, nos solos, na água, no ar, bem como nos organismos vivos (MANDAL; SUZUKI, 2002). Segundo os mesmos autores, esse elemento é considerado um não-metal, no entanto, costuma ser referido como um metal pesado devido à sua toxicidade. A agência federal de saúde pública dos Estados Unidos (*Agency for Toxic Substances and Disease Registry - ATSDR*) inseriu o arsênio em primeira posição na lista dos principais poluentes, baseado na toxicidade e potencial de exposição humana (ATSDR, 2022). A exposição crônica ao arsênio tem sido associada ao desenvolvimento de diversos tipos de cânceres, como por exemplo, bexiga, rim, fígado, pele e pulmão (IARC, 2012), assim como outras doenças respiratórias e cardiovasculares (HUGHES et al., 2011; JOMOVA et al., 2011). Nas plantas, o arsênio não possui função biológica conhecida, seu nível de toxicidade pode variar para diferentes espécies de plantas (BALI; SIDHU, 2021). É considerado altamente tóxico para algumas enzimas, o que pode causar a inibição do crescimento e morte dos organismos (NAGAJYOTI, 2010). Alguns estudos determinaram a concentração de As no lenho de diferentes espécies em ambientes urbanos e/ou industriais. Odabasi et al. (2016), por exemplo, avaliaram espécies de *Pinus brutia* e *Pinus pinea* na região da Turquia e encontraram o valor

médio de 0,02 mg/kg; Martin et al. (2018), avaliaram *Pinus halepensis* em região mediterrânea na Espanha e encontraram 0,05 mg/kg; Austruy et al. (2019), avaliaram a espécie *Pinus halepensis* e *Populus nigra* no sul da França e encontraram 0,007 mg/kg em área urbana e 0,02 mg/kg em área industrial e Muñoz et al., (2019), avaliaram *Cupressus macrocarpa* na região central do Chile e encontraram valores acima de 0,06 mg/kg. Todos esses valores foram muito abaixo dos encontrados no presente estudo, por exemplo 0,17 mg/kg em Resende e 0,38 mg/kg em Volta Redonda. Portanto, as altas concentrações de arsênio em Volta Redonda podem estar associadas à intensa atividade siderúrgica da região.

As concentrações dos elementos acumulados na madeira da cidade de Volta Redonda foram comparadas entre as regiões (SE e NO). Os elementos Fe, Pb, Zn e Cr se destacaram, no entanto a região noroeste apresentou as maiores concentrações de Fe e Pb e a região sudeste maiores concentrações de Zn e Cr. Dentre esses elementos, o Fe e o Zn são considerados micronutrientes essenciais em processos bioquímicos, como a síntese de clorofila e atividades enzimáticas (TAIZ; ZIEGER 2013), porém, em elevadas concentrações podem ser prejudiciais (EL-HASAN et. al., 2002; CARMONA et al. 2015). Em contrapartida, Pb e Cr são elementos não-essenciais, ou seja, não apresentam função biológica definida nas plantas e possuem alta toxicidade (NAGAJYOTI et al. 2010; TAIZ; ZIEGER 2013). A presença de chumbo pode causar efeitos negativos na morfologia, na atividade fotossintética e no crescimento das plantas (REHMAN et al., 2021). Em humanos, o Pb pode causar diminuição de antioxidantes nas células (ERCAL et al., 2001), aumentar a chance de infertilidade no homem (MENDIOLA et al., 2011) e reduzir a concentração de hemoglobina, causando anemia (SANDERS et al., 2009). O Cr é proveniente tanto de atividades naturais quanto antrópicas, porém, é considerado tóxico por causar impacto na fotossíntese, interferir na absorção de nutrientes, afetar a germinação de sementes (REHMAN et al., 2021), e pode retardar o crescimento dos ramos e reduzir a área foliar (DAVIES et al., 2002). Os compostos em que o cromo está presente foram classificados pela Agência Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (IARC, 2012) como carcinógenos humanos, causando toxicidade em vários órgãos, como alergias e cânceres de órgãos respiratórios. As concentrações críticas dos elementos Fe, Pb, Zn e Cr que causam toxicidade em plantas variam bastante. Por exemplo, para o Fe, concentrações entre 400 e 1.000 mg/kg podem ser consideradas críticas (KERBAUY, 2004); para o Pb, níveis superiores a 30 mg/kg (GERALDO et al., 2014); em plantas cultivadas, 200 a 500 mg/kg para Zn, podendo chegar a 8.000 mg/kg em espécies nativas tolerantes (KERBAUY, 2004); e para o Cr, concentrações de 20 a 80 mg/kg (RADHA et al., 2000).

Diversos estudos investigaram as concentrações de Fe, Pb, Zn e Cr em espécies lenhosas sob interferência urbana e/ou industrial, como por exemplo, Odabasi et al., (2016) encontraram concentrações médias de 0,15 mg/kg para Pb e 11,90 mg/kg para Zn em espécies de *Pinus* em região da Turquia; Martin et al. (2018), avaliaram *Pinus halepensis*, em região da Espanha, e encontraram 1,24 mg/kg para Pb e 0,59 mg/kg para Cr; Austruy et al. (2019), avaliaram as espécies de *P. halepensis* e *P. nigra*, no sul da França, e encontraram até 63,75 mg/kg para o elemento Fe, até 0,39 mg/kg para Pb, até 27,53 mg/kg para Zn e até 0,92 mg/kg para o elemento Cr; Muñoz et al., (2019), avaliaram *Cupressus macrocarpa*, no Chile, e encontraram concentrações acima de 150 mg/kg para o elemento Fe, acima de 0,2 mg/kg para Pb, acima de 8,00 mg/kg Zn e acima de 3,00 mg/kg para Cr; No Brasil, Chagas (2013) avaliou a concentração de metais em diferentes espécies urbanas, *C. pluviosa* e *T. pentaphylla*, em Paulínia, São Paulo, e observou concentrações de até 31,30 mg/kg para o elemento ferro, 0,43 mg/kg para o chumbo, 5,58 mg/kg para zinco e 0,28 mg/kg para o elemento cromo; e Vasconcelos (2016) avaliou a concentração dos elementos nos anéis de crescimento de *Ceiba speciosa*, na cidade do Rio de Janeiro e encontrou valores acima de 40 mg/kg para Fe e valores acima de 10 mg/kg para Zn, em diferentes anos. Independente das regiões (SE e NO), menores concentrações de Fe e Zn foram encontradas na madeira de *T. catappa* quando comparadas às espécies arbóreas dos

estudos mencionados. No entanto, ao comparar os elementos Pb e Cr, as concentrações foram maiores. Tal fato pode estar relacionado à proximidade dos espécimes nos arredores da indústria, visto que esses elementos são provenientes de emissões siderúrgicas, sendo um fator que pode ter contribuído para as maiores concentrações.

As comparações realizadas entre períodos de crescimento, em cada local de estudo, evidenciaram um certo padrão para quase todos os elementos analisados na madeira de *T. catappa*. Foi observado que, no geral, as maiores concentrações ocorreram nos períodos PI e PIII, que correspondem ao período próximo à medula e ao período próximo ao câmbio, respectivamente. A translocação radial de um elemento químico ao longo do xilema é uma questão importante a ser considerada e pode ser a principal limitação em estudos dendroquímicos (ALTERIO et al., 2020; BALLIKAYA et al., 2022). Portanto, ao compreender a forma pela qual o transporte dos elementos ocorre no xilema, é possível que inferências mais concretas sejam realizadas a respeito da deposição nos anéis de crescimento anuais e sua possível relação com o ambiente (NABAIS et al., 1999).

Uma vez que os elementos químicos, por exemplo os metais traço, estão sendo transportados pelos vasos condutores (ou traqueídeos), podem migrar em toda a largura do alburno por meio da translocação radial (LEEP, 1975; WATMOUGH, 1997; SCHARNWEBER et al., 2016), que ocorre através das células do parênquima radial (BALLIKAYA et al., 2022). As variações das concentrações desses elementos na madeira podem estar relacionadas às atividades fisiológicas das árvores, como por exemplo a senescência do alburno, a formação do cerne ou infecção em decorrência de ataque de patógenos (NABAIS et al., 1999; MEERTS, 2002). O processo de formação do cerne é conhecido por estar associado à etapa final da atividade fisiológica das células dos raios (PIQUERAS et al., 2020), e durante esse processo, a translocação de elementos tóxicos na fronteira alburno-cerne foi sugerida por Stewart (1966) como um possível mecanismo de desintoxicação do alburno. Por esse motivo, a concentração dos elementos é mais comum na fronteira alburno-cerne e podem apresentar variações acentuadas (CUTTER; GUYETTE, 1993; BINDA et al. 2021). Em virtude de o transporte radial ativo de elementos ser específico às células do alburno, Ballikaya et al., 2022 sugerem que, a data de detecção de um elemento nos anéis de crescimento do alburno é referente a uma resolução de longo prazo, ou seja, será referente ao período correspondente ao alburno.

A mobilidade dos elementos também deve ser considerada e pode depender de pelo menos seis fatores, como por exemplo, as concentrações de equilíbrio entre alburno-cerne, a ligação na matriz no xilema, o pH da seiva, a natureza essencial do elemento, a razão carga/raio iônico e a solubilidade iônica (CUTTER; GUYETTE, 1993). A mobilidade e a disponibilidade de metais nos solos são controladas pela adsorção e dessorção (KRISHNAMURTI et al., 1999), que estão diretamente associadas às propriedades do solo, incluindo o pH, as concentrações de matéria orgânica, a capacidade de troca catiônica, o potencial de oxidação-redução, a textura, a estrutura e o teor de argilas (KASHEM; SINGH, 2001, ANTONIADIS et al., 2008, USMAN et al., 2008). Dentre as diversas propriedades do solo, o pH é fator mais importante que afeta a disponibilidade dos elementos. Por exemplo, com a diminuição do pH, foram observados significativos aumentos na dessorção de metais pesados nos constituintes do solo (SUKREEYAPONGSE et al., 2002, BANG; HESTERBERG, 2004). Dessa maneira, a mobilidade e a disponibilidade desses metais também aumentam com a diminuição do pH do solo (LEE et al., 2009; BROKBARTOLD et al., 2012), favorecendo a absorção pelas plantas (ANTONIADIS, 2017).

Neste estudo, as zonas de transição alburno-cerne não foram delimitadas. No entanto, ao separar as amostras em três períodos, é possível que as zonas de transição estejam mais frequentes no período III, uma vez que grande parte das amostras apresentavam uma largura de alburno inferior à de cerne e, por esse motivo, podem explicar as altas concentrações de diversos

elementos nesse período. E em relação ao período I, é possível observar que os anéis costumam ser mais largos nas porções centrais do caule (próximo à medula) (FRITTS; SWETNAM, 1989), por isso, a idade jovem das árvores nesse período de formação do lenho pode ser um fator que contribuiu para o aumento dos elementos, visto que árvores jovens tendem a absorver, mobilizar e acumular grande quantidade de elementos químicos (PRICHETT e FISHER, 1987) em função do seu crescimento. Nesse sentido, a absorção e a concentração de metais traço nos anéis das árvores podem ser influenciadas por diversos fatores, incluindo as diferentes condições do ambiente, do crescimento e das características de absorção por diferentes espécies arbóreas (BALLIKAYA et al., 2022).

De maneira geral, ao comparar os diferentes tecidos (madeira e casca), as cascas foram capazes de registrar as maiores concentrações de metais. A casca externa se trata de um tecido fisiologicamente inativo, que está sendo descartado constantemente devido ao crescimento das árvores (CUTTER; GUYETTE, 1993). Ainda que possam ser úteis no monitoramento da poluição do ar, por acumular grandes quantidades de material particulado (CATINON et al., 2009), os resultados podem não ser representativos de uma acumulação de contaminantes atmosféricos ao longo dos anos, sendo mais provável que corresponda a um período de acumulação de alguns meses, com diferenças importantes entre as áreas que foram lavadas pela chuva e as áreas protegidas de lixiviação (CATINON et al., 2009; AUSTRUY et al., 2019). Diferente do que ocorre no lenho, em que as árvores continuam a formar os anéis de crescimento ao longo dos anos, conferindo-lhes o potencial de registrar eventos em diferentes períodos do tempo (SPEER, 2010). Contudo, a casca ainda demonstra ser eficiente no monitoramento da poluição do ar, acumulando grandes quantidades de poeira atmosférica (CATINON et al., 2009). Nesse aspecto, um desafio encontrado para a utilização das cascas ainda está relacionado a identificação de espécies arbóreas que se adequem melhor ao papel no biomonitoramento do que outras (MOREIRA et al., 2018). A morfologia da casca é uma característica que está sujeita a variabilidade interespecífica de acordo com o ambiente (SGRIGNA et al., 2020) o que pode proporcionar grande potencial para a espécie ao registrar as concentrações dos elementos no ar (SZCZEPANIAK E BIZIUK, 2003). De acordo com Ukpebor et al. (2010), as cascas com maior rugosidade têm uma superfície de absorção mais alta em relação às cascas finas, e a camada externa contém maiores concentrações de metais pesados, pois estão mais expostas à poluição.

Dentre os elementos analisados nas cascas da espécie *T. catappa*, Pb e Cd foram significativos entre as regiões de Resende e Volta Redonda, sendo observadas maiores concentrações de Pb em Volta Redonda e Cd em Resende. No entanto, entre as regiões sudeste e noroeste, somente os elementos Cr e As foram significativos. Maiores concentrações de Cr foram observadas na região sudeste e maiores concentrações de As na região noroeste. O elemento cádmio ocorre naturalmente na crosta terrestre e no oceano, sendo emitido para o ambiente como resultado de atividades naturais e antrópicas (IARC, 2012). Ocupa a sétima posição na lista dos principais poluentes tóxicos à saúde humana, segundo a agência federal de saúde pública dos Estados Unidos (ATSDR, 2022), sendo considerado principal carcinógeno humano pela Agência Internacional de Pesquisa em Câncer (IARC, 1993). Em plantas, os efeitos devido à toxicidade são o retardamento no crescimento, clorose foliar e interferência na abertura e fechamento dos estômatos (REHMAN et al., 2021). Segundo o mesmo autor, a concentração de Cd em solos não contaminados é inferior a 1 ppm, no entanto, a concentração permitida em terras cultivadas pode ser de até 100 mg/kg.

Estudos mostraram o potencial de registro de metais contaminantes em cascas de diversas espécies utilizadas no monitoramento do ar, como por exemplo em cascas das espécies *Prunus sargentii* e *Acer saccharum*, no Reino Unido, Suzuki (2006) encontrou valores entre 0,12 a 1070 mg/kg para chumbo, 0,08 a 0,16 mg/kg para cádmio, 0,19 a 3,54 mg/kg para cromo e 0,09 a 1,74 mg/kg para arsênio; Catinon et al., (2009), avaliaram cascas da espécie *Fraxinus excelsior* em campus universitário na França, e encontraram concentrações de 1900 mg/kg para

chumbo, 20 mg/kg para cádmio, 95 mg/kg para cromo e 22 mg/kg para arsênio; cascas de *Quercus pubescens* foram analisadas por Cocozza et al., (2016) que encontraram valores acima de 3 mg/kg de chumbo e valores acima de 1 mg/kg de cromo, em região da Itália; em Portugal, Brignole et al., (2018) avaliaram cascas de *Jacaranda mimosifolia*, na cidade de Lisboa, e encontraram valores como 7 mg/kg para o chumbo, 0,09 mg/kg para cádmio e 0,72 mg/kg para arsênio; em região central de Buenos Aires, na Argentina, Chaparro et al., (2020) utilizaram cascas de diversas árvores urbanas e encontraram valores de 32,4 mg/kg para chumbo e 4,8 mg/kg para cromo. No Brasil, Moreira et al., (2016) avaliaram cascas das espécies de *Tipuana tipu*, *Caesalpinia pluviosa*, *Ligustrum* sp. e *Tibouchina granulosa*, na região metropolitana de São Paulo, e encontraram valores interessantes para diversos metais, como por exemplo, 778 mg/kg para ferro, 579 mg/kg para alumínio, 96 mg/kg para zinco, 6 mg/kg para cobre e 39 mg/kg para manganês; Locosselli et al., (2020) também avaliaram cascas de *Tipuana tipu* e *Poincianella pluviosa*, porém, em região industrial próximo à cidade de São Paulo, e observaram valores como 1204 mg/kg para ferro, 760,11 mg/kg para alumínio, 167,93 mg/kg para zinco, 7,07 mg/kg para cobre e 109,03 mg/kg para manganês. No Rio de Janeiro, Souza et al., (2019) avaliaram o potencial da casca de *Poincianella pluviosa* no biomonitoramento de metais pesados em região central na cidade de Volta Redonda e encontraram diversos metais associados à indústria siderúrgica e ao tráfego veicular, como por exemplo, concentrações aproximadas de 2,5 mg/kg de chumbo, 0,12 mg/kg de cádmio, 8,27 mg/kg de cobre, 2,1 mg/kg de níquel, 89,80 mg/kg de manganês, 2071 mg/kg de ferro e 54,9 mg/kg de zinco. Ao comparar os valores do presente estudo com os encontrados por Souza et al., (2019), realizados na mesma cidade, foi possível observar que, de maneira geral, as concentrações dos elementos presentes nas cascas de *T. catappa* foram próximas ao encontrado para a espécie *P. pluviosa*.

Ainda, vale destacar o estudo realizado por Gioda et al., (2004), que analisaram a composição química do material particulado emitido na cidade de Volta Redonda. Os autores observaram que todos os metais monitorados (Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn) estavam em alta concentração, sendo zinco e ferro os elementos que apresentaram as maiores concentrações. Zinco variou de 0,006 a 7,0  $\mu\text{g m}^{-3}$  e o ferro variou de 1,4 a 5,2  $\mu\text{g m}^{-3}$ . No entanto, apenas o Mn ultrapassou o limite de 0,15  $\mu\text{g m}^{-3}$ , sugerido à época, pela Organização Mundial da Saúde (WHO, 2000) e pela Agência Ambiental Europeia (EEA, 2000), quando considerado como média anual. Em relação ao encontrado nas cascas de *T. catappa*, concentrações muito superiores foram identificadas, evidenciando não só a capacidade de retenção pelas cascas, mas também a quantidade de elementos prejudiciais à saúde que, em algum momento, estiveram disponíveis no ar.

## **5 CONCLUSÕES**

A possibilidade de utilizar árvores urbanas para determinar as concentrações de metais considerados prejudiciais à saúde humana, contribui para o monitoramento ambiental desses elementos no espaço e no tempo. O presente estudo identificou os elementos mais abundantes na cidade de Volta Redonda por meio de análise elementar do lenho e da casca da espécie *T. catappa*. O arsênio foi o elemento que apresentou maiores concentrações no lenho e o chumbo maiores concentrações na casca das árvores da cidade de Volta Redonda, sendo necessária atenção a esses elementos devido à toxicidade e riscos à exposição crônica, uma vez que são responsáveis pelo surgimento de diversos tipos de cânceres. Os resultados dessa pesquisa podem ser úteis tanto para informar a população, quanto para alertar os órgãos ambientais fiscalizadores sobre o efetivo controle e monitoramento das emissões de poluentes atmosféricos, principalmente os oriundos da indústria siderúrgica. Nesse sentido, os resultados são importantes para inferir a respeito dos níveis passados e atuais de poluição atmosférica na cidade de Volta Redonda.

## **CONCLUSÕES GERAIS**

As análises dos anéis de crescimento mostram como a espécie *T. catappa* se comportou em ambiente urbano, apresentando diferenças nos incrementos e sensibilidade aos fatores climáticos em área mais exposta à poluição siderúrgica. Portanto, a possibilidade de delimitar e analisar os anéis de *T. catappa* contribui para a realização de estudos dendrocronológicos futuros, ampliando a compreensão do comportamento dessa espécie em diversas escalas regionais.

A determinação das concentrações de metais considerados prejudiciais à saúde humana utilizando árvores urbanas, favorecem o monitoramento ambiental desses elementos no espaço e no tempo. Foi identificado que os elementos arsênio e chumbo apresentaram as maiores concentrações no lenho e na casca das árvores da cidade de Volta Redonda, respectivamente. Os dados do presente estudo podem ser úteis para informar a população e alertar os órgãos fiscalizadores sobre o efetivo controle e monitoramento das emissões de poluentes atmosféricos, uma vez que a exposição crônica aos elementos tóxicos pode causar diversas doenças, como cânceres.

Ainda é interessante ressaltar que investigações mais profundas como análises anatômicas do lenho, propriedades hidráulicas do xilema, análises de solo e estudo fenológico da espécie *T. catappa* podem favorecer o desenvolvimento de novas interpretações sobre crescimento e adaptação ao ambiente, uma vez que podem sofrer interferências de diversos fatores quando em meio urbano.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASSI, Y.; AHMADIKIA, H.; BANIASADI, E.. Impact of wind speed on urban heat and pollution islands. **Urban Climate**, v. 44, p. 101200, 2022.
- AGUDELO-CASTAÑEDA, D. M. et al. Exposure to polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric PM<sub>1.0</sub> of urban environments: Carcinogenic and mutagenic respiratory health risk by age groups. **Environmental pollution**, v. 224, p. 158-170, 2017.
- ALMEIDA, E. S.; SILVA, L. A.; SOUSA, R. M.; RICHTER, E. M.; FOSTER, C. W.; BANKS, C. E.; MUÑOZ, R. A. Organic-resistant screen-printed graphitic electrodes: Application to on-site monitoring of liquid fuels. **Analytica Chimica Acta**, v. 934, p.1-8, 2016.
- ALTERIO, E. et al. Preserving air pollution forest archives accessible through dendrochemistry. **Journal of environmental management**, v. 264, p. 110462, 2020.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVES, E. S.; TRESMONDI, F.; LONGUI, E. L. Análise estrutural de folhas de *Eugenia uniflora* L. (Myrtaceae) coletadas em ambientes rural e urbano, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 22, p. 241-248, 2008.
- ANTONIADIS, V. et al. Trace elements in the soil-plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation—A review. **Earth-Science Reviews**, v. 171, p. 621-645, 2017.
- ANTONIADIS, V.; ROBINSON, J. S.; ALLOWAY, B. J. Effects of short-term pH fluctuations on cadmium, nickel, lead, and zinc availability to ryegrass in a sewage sludge-amended field. **Chemosphere** 71, 759-764, 2008.
- ANTUNES, G. A.; SANTOS, H. S. DOS; SILVA, Y. P. DA; SILVA, M. M.; PIATNICKI, C. M. S.; SAMIOS, D. Determination of iron, copper, zinc, aluminum, and chromium in biodiesel by flame atomic absorption spectrometry using a microemulsion preparation method. **Energy Fuels**, v.31, p.2944-2950, 2017.
- ARAGÃO, J. R. V.; GROENENDIJK, P.; LISI, C. S. Dendrochronological potential of four neotropical dry-forest tree species: Climate-growth correlations in northeast Brazil. **Dendrochronologia**, v. 53, p. 5-16, 2019.
- ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry – ATSDR. **ATSDR's Substance Priority List**. 2022. Disponível em: <<https://www.atsdr.cdc.gov/spl/index.html>>. Acesso em: 25 julho 2022.
- AUSTRUY, A. et al. Evaluation of historical atmospheric pollution in an industrial area by dendrochemical approaches. **Chemosphere**, v. 220, p. 116-126, 2019.

BALI, A. S.; SIDHU, G. P. S. Arsenic acquisition, toxicity, and tolerance in plants-From physiology to remediation: A review. ***Chemosphere***, v. 283, p. 131050, 2021.

BALLIKAYA, P.; MARSHALL, J.; CHERUBINI, P. Can tree-ring chemistry be used to monitor atmospheric nanoparticle contamination over time?. ***Atmospheric Environment***, v. 268, p. 118781, 2022.

BANG, J., HESTERBERG, D. Dissolution of trace element contaminants from two coastal plain soils as affected by pH. ***Journal of Environmental Quality*** 33, 891-901, 2004.

BARTENS, J. et al. 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.

BATTIPAGLIA, G. et al. Traffic pollution affects tree-ring width and isotopic composition of *Pinus pinea*. ***Science of the total Environment***, v. 408, n. 3, p. 586-593, 2010.

BELKACEM, I. et al. Road traffic nanoparticle characteristics: Sustainable environment and mobility. ***Geoscience Frontiers***, v. 13, n. 1, p. 101196, 2022.

BINDA, G.; DI IORIO, A.; MONTICELLI, D. The what, how, why, and when of dendrochemistry:(paleo) environmental information from the chemical analysis of tree rings. ***Science of the Total Environment***, v. 758, p. 143672, 2021.

BRIENEN, R. J. W.; SCHÖNGART, J.; ZUIDEMA, P. A. Tree rings in the tropics: insights into the ecology and climate sensitivity of tropical trees. ***Tropical tree physiology***, p. 439-461, 2016.

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

BRIFFA, K. R.; JONES, P. D. ***Basic chronology statistics and assessment***. 1990.

BRIGNOLE, D. et al. Chemical and magnetic analyses on tree bark as an effective tool for biomonitoring: A case study in Lisbon (Portugal). ***Chemosphere***, v. 195, p. 508-514, 2018.

BROKBARTOLD, M.; GRUPE, M.; MARSCHNER, B. Effectiveness of different soil amendments to reduce the Pb and Zn extractability and plant uptake in soils contaminated by anticorrosion paints beneath pylons. ***Journal of Plant Nutrition and Soil Science***, 175, 443-455, 2012.

BURAS, A. A comment on the expressed population signal. ***Dendrochronologia***, v. 44, p. 130-132, 2017.

CARMONA, E. R. et al. Genotoxic and oxidative stress potential of nanosized and bulk zinc oxide particles in *Drosophila melanogaster*. ***Toxicology and Industrial Health***, 1–15. 2015.

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

CATINON, M. et al. Atmospheric inorganic contaminants and their distribution inside stem tissues of *Fraxinus excelsior* L. **Atmospheric environment**, v. 42, n. 6, p. 1223-1238, 2008.

CATINON, M. et al. The anthropogenic atmospheric elements fraction: a new interpretation of elemental deposits on tree barks. **Atmospheric environment**, v. 43, n. 5, p. 1124-1130, 2009.

CATINON, M. et al. Tree bark suber-included particles: a long-term accumulation site for elements of atmospheric origin. **Atmospheric environment**, v. 45, n. 5, p. 1102-1109, 2011.

CHAGAS, M. P. Caracterização dos anéis de crescimento e dendrocronologia de árvores de *Grevillea robusta* A. Cunn, *Hovenia dulcis* Thunb., *Persea americana* Mill., *Tabebuia pentaphylla* Hemsl. e *Terminalia catappa* L. nos municípios de Piracicaba e Paulínia, SP. 2009. 144 f. Dissertação (Mestrado Ciências) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2009.

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. 2013. 158 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, São Paulo, 2013.

CHAPARRO, M. A. E. et al. Fine air pollution particles trapped by street tree barks: In situ magnetic biomonitoring. **Environmental Pollution**, v. 266, p. 115229, 2020.

CHEN, J. et al. The concentrations and reduction of airborne particulate matter (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>1</sub>) at shelterbelt site in Beijing. **Atmosphere**, v. 6, n. 5, p. 650-676, 2015.

COCOZZA, C. et al. Integrated biomonitoring of airborne pollutants over space and time using tree rings, bark, leaves, and epiphytic lichens. **Urban forestry & urban greening**, v. 17, p. 177-191, 2016.

COCOZZA, C. et al. Monitoring air pollution close to a cement plant and in a multi-source industrial area through tree-ring analysis. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 38, p. 54030-54040, 2021.

COOK, E. R.; HOLMES, R. L. Guide for computer program ARSTAN. In H.D. GRISSINO-MAYER, R. L. HOLMES, AND H. C. FRITTS (Ed.) **The international tree-ring Data Bank Program Library version 2.0 user's manual**. pp 75–87. University of Arizona.Tucson.1996.

COSTA, V. B. S. et al. Influência da Poluição Atmosférica em *Terminalia catappa* L. em Áreas Urbanizadas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 02, p. 236-252, 2015.

CUTTER, B. E.; GUYETTE, R. P. Anatomical, chemical, and ecological factors affecting tree species choice in dendrochemistry studies. **Journal of Environmental Quality**, v. 22, n. 3, p. 611-619, 1993.

DAVIES JR, F. T. et al. Mycorrhizal fungi increase chromium uptake by sunflower plants: influence on tissue mineral concentration, growth, and gas exchange. **Journal of Plant Nutrition**, v. 25, n. 11, p. 2389-2407, 2002.

DE CARVALHO MARIA, T. R. B. et al. Evaluation of *Terminalia catappa* street trees: A case study in Itanhaém–São Paulo, Brazil. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 66, p. 127373, 2021.

DE RIDDER, M. et al. A tree-ring based comparison of *Terminalia superba* climate–growth relationships in West and Central Africa. **Trees**, v. 27, n. 5, p. 1225-1238, 2013.

DOUCET, A. et al. Combining tree-ring metal concentrations and lead, carbon, and oxygen isotopes to reconstruct peri-urban atmospheric pollution. **Tellus B: Chemical and Physical Meteorology**, v. 64, n. 1, p. 19005, 2012.

DRAVA, G. et al. Urban and industrial contribution to trace elements in the atmosphere as measured in holm oak bark. **Atmospheric Environment**, v. 144, p. 370-375, 2016.

EEA, European Environmental Agency; Guidelines, 2000.

EL-HASAN, T. et al. Cypress tree (*Cupressus semervirens* L.) bark as an indicator for heavy metal pollution in the atmosphere of Amman City, Jordan. **Environment International**, v. 28, n. 6, p. 513-519, 2002.

ERCAL, N. et al. Toxic metals and oxidative stress part I: mechanisms involved in metal-induced oxidative damage. **Current topics in medicinal chemistry**, v. 1, n. 6, p. 529-539, 2001.

FANG, K. et al. Influence of non-climatic factors on the relationships between tree growth and climate over the Chinese Loess Plateau. **Global and Planetary Change**, v. 132, p. 54-63, 2015.

FLORES, E. M. *Terminalia catappa* L.: tropical tree seed manual. Species Descriptions, 2p, 2003.

FONTANA, C. et al. Dendrochronology and climate in the Brazilian Atlantic Forest: Which species, where and how. **Neotropical Biology and Conservation**, v. 13, n. 4, p. 321-333, 2018.

FRITTS, H. C.; SWETNAM, T. W. **Dendroecology: a tool for evaluating variations in past and present forest environments**. In: Advances in ecological research. Academic Press. p. 111-188, 1989.

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

FUZZI, S. et al. Particulate matter, air quality and climate: lessons learned and future needs. **Atmospheric chemistry and physics**, v. 15, n. 14, p. 8217-8299, 2015.

GASPARD, D. T. et al. Tree ring responses to climate variability of xerophytic thickets from South Soalala, Madagascar. **Dendrochronologia**, v. 49, p. 57-67, 2018.

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.

GILLNER, S.; BRÄUNING, A.; ROLOFF, A. Dendrochronological analysis of urban trees: climatic response and impact of drought on frequently used tree species. **Trees**, v. 28, n. 4, p. 1079-1093, 2014.

GIODA, A. et al. Evaluation of air quality in Volta Redonda, the main metallurgical industrial city in Brazil. **J. Braz. Chem. Soc.**, São Paulo, v.15, n.6, p. 856- 864, 2004.

GRANTZ, D. A.; GARNER, J. H. B.; JOHNSON, D. W. Ecological effects of particulate matter. **Environment international**, v. 29, n. 2-3, p. 213-239, 2003.

GRATANI, L.; CRESCENTE, M. F.; VARONE, L. Long-term monitoring of metal pollution by urban trees. **Atmospheric Environment**, 42, 8273–8277, 2008.

GRISSINO-MAYER, H. D. **Evaluating crossdating accuracy: a manual and tutorial for the computer program COFECHA**. 2001.

HAMMER, Ø. et al. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. **Palaeontologia electronica**, v. 4, n. 1, p. 9, 2001.

HAN, D. et al. A review on particulate matter removal capacity by urban forests at different scales. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 48, p. 126565, 2020.

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

HUGHES, M. F. et al. Arsenic exposure and toxicology: a historical perspective. **Toxicological sciences**, v. 123, n. 2, p. 305-332, 2011.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER - IARC. **IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to humans: Arsenic, metals, fibres, and dusts.**; IARC Press: Leon, France, Volume 100C, pp. 41–48, 2012.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass. **Apresentado em: IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans: Beryllium, Lyon**, 1993.

IQBAL, M. et al. Foliar characteristics, cambial activity, and wood formation in *Azadirachta indica* A. Juss. as affected by coal-smoke pollution. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 205, n. 1, p. 61-71, 2010a.

IQBAL, Muhammad et al. Behavioral responses of leaves and vascular cambium of *Prosopis cineraria* (L.) Druce to different regimes of coal-smoke pollution. **Journal of Plant Interactions**, v. 5, n. 2, p. 117-133, 2010b.

ISINKARALAR, K. The large-scale period of atmospheric trace metal deposition to urban landscape trees as a biomonitor. **Biomass Conversion and Biorefinery**, p. 1-10, 2022.

IVANI, S. D. A.; SILVA, B. M. D. S.; OLIVEIRA, C. D.; MÔRO, F. V. Morfologia de frutos, sementes e plântulas de castanheira (*Terminalia catappa* L.- combretaceae). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, n. 2, p. 517-522, 2008.

JIN, Ling et al. Airborne particulate matter pollution in urban China: a chemical mixture perspective from sources to impacts. **National Science Review**, v. 4, n. 4, p. 593-610, 2017.

JOMOVA, K. et al. Arsenic: toxicity, oxidative stress, and human disease. **Journal of Applied Toxicology**, v. 31, n. 2, p. 95-107, 2011.

KASHEM, M. A.; SINGH, B. R. Metal availability in contaminated soils: I. Effects of flooding and organic matter on changes in Eh, pH and solubility of Cd, Ni and Zn. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, 61, 247-255, 2001.

KERBAUY, G. B. **Fisiología Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 165-181, 2004.

KRISHNAMURTI, G. S. R.; HUANG, P. M. KOZAK, L. M. Sorption and desorption kinetics of cadmium from soils: influence of phosphate. **Soil Science** 164, 888-898, 1999.

KUKARSKIH, V. V. et al. Radial growth of Scots pine in urban and rural populations of *Ekaterinburg megalopolis*. **Dendrochronologia**, p. 125974, 2022.

LANZACO, B. L. et al. Elemental composition of PM<sub>0.25</sub> collected in an urban site of Argentina: A first case study. **Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy**, v. 161, p. 105712, 2019.

LARUE, C. et al. Foliar exposure of the crop *Lactuca sativa* to silver nanoparticles: evidence for internalization and changes in Ag speciation. **Journal of hazardous materials**, v. 264, p. 98-106, 2014.

LEE, S. H.; LEE, J. S.; CHOI, Y. J.; KIM, J. G. In situ stabilization of cadmium-, lead-, and zinc-contaminated soil using various amendments. **Chemosphere**, 77, 1069-1075, 2009.

LEONELLI, G. et al. Climatic isotope signals in tree rings masked by air pollution: A case study conducted along the Mont Blanc Tunnel access road (Western Alps, Italy). **Atmospheric Environment**, v. 61, p. 169-179, 2012.

LEPP, N.W. The potential of tree-ring analysis for monitoring heavy metal pollution patterns. **Environmental Pollution**, v. 9, 1975.

LI, Q.; LI, Y.; ZHU, L.; XING, B.; CHEN, B. Dependence of plant uptake and diffusion of polycyclic aromatic hydrocarbons on the leaf surface morphology and micro-structures of cuticular waxes. **Scientific Reports**, 7:46235, 2017.

LIU, Yu et al. Elements content in tree rings from Xi'an, China, and environmental variations in the past 30 years. **Science of the Total Environment**, v. 619, p. 120-126, 2018.

LOCOSCELLI, G. M. et al., Tree rings reveal the reduction of Cd, Cu, Ni and Pb pollution in the central region of São Paulo, Brazil. **Environmental Pollution**, v. 242, p. 320-328, 2018.

LOCOSCELLI, G. M.; DE CAMARGO, E. P.; MOREIRA, T. C. L.; TODESCO, E.; DE FÁTIMA ANDRADE, M.; DE ANDRÉ, C. D. S.; ... & BUCKERIDGE, M. S. The role of air pollution and climate on the growth of urban trees. **Science of the Total Environment**, v. 666, p. 652-661, 2019.

LOCOSCELLI, G. M. et al. Spatial-temporal variability of metal pollution across an industrial district, evidencing the environmental inequality in São Paulo. **Environmental Pollution**, v. 263, p. 114583, 2020.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R. Climate-growth relationships for *Aspidosperma tomentosum* Mart. in South American tropical dry forests. **Annals of Forest Science**, v. 77, n. 4, p. 1-11, 2020.

LORENZI, Harri. **Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas**. Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2003.

LUO, X. S.; YU, S.; LI, X. D. Distribution, availability, and sources of trace metals in different particle size fractions of urban soils in Hong Kong: implications for assessing the risk to human health. **Environ. Pollut.** 159, 1317-1326, 2011.

LUO, X.; BING, H.; LUO, Z.; WANG, Y.; JIN, L. Impacts of atmospheric particulate matter pollution on environmental biogeochemistry of trace metals in soil-plant system: A review. **Environmental Pollution**, p. 113138, 2019.

MA, T. et al. Air pollution characteristics and their relationship with emissions and meteorology in the Yangtze River Delta region during 2014–2016. **Journal of Environmental Sciences**, v. 83, p. 8-20, 2019.

MANDAL, B. K.; SUZUKI, K. T. Arsenic round the world: a review. **Talanta**, v. 58, n. 1, p. 201-235, 2002.

MANES, F.; INCERTI, G.; SALVATORI, E.; VITALE, M.; RICOTTA, C.; COSTANZA, R. Urban ecosystem services: tree diversity and stability of tropospheric ozone removal. **Ecol. Appl.** 22, 349–360, 2012.

MARĆ, M. et al. Current air quality analytics and monitoring: A review. **Analytica Chimica Acta**, v. 853, p. 116-126, 2015.

MARCELO-PEÑA, J. L. et al. Characterizing growth rings in the trees of Perú: A wood anatomical overview for potential applications in dendroecological-related fields. **Dendrochronologia**, v. 62, p. 125728, 2020.

MARQUES, D. M. et al. Root morphology and leaf gas exchange in *Peltophorum dubium* (Spreng.) Taub. (Caesalpinoideae) exposed to copper-induced toxicity. **South African Journal of Botany**, v. 121, p. 186-192, 2019.

MARTIN, J. A. R. et al. Wood and bark of *Pinus halepensis* as archives of heavy metal pollution in the Mediterranean Region. **Environmental Pollution**, v. 239, p. 438-447, 2018.

MEDEIROS, J. G. S. et al. Tree-ring characterization of *Araucaria columnaris* Hook and its applicability as a lead indicator in environmental monitoring. **Dendrochronologia**, v. 26, n. 3, p. 165-171, 2008.

MEERTS, P. Mineral nutrient concentrations in sapwood and heartwood: a literature review. **Annals of Forest Science**, v. 59, n. 7, p. 713-722, 2002.

MENDIOLA, J. et al. Relationships between heavy metal concentrations in three different body fluids and male reproductive parameters: a pilot study. **Environmental Health**, v. 10, n. 1, p. 1-7, 2011.

MÉRIAN, P.; PIERRAT, J.; LEBOURGEOIS, F. Effect of sampling effort on the regional chronology statistics and climate-growth relationships estimation. **Dendrochronologia**, v. 31, n. 1, p. 58-67, 2013.

MONTINE, P. S. M. et al. Seasonality of epigaeic ant communities in a Brazilian Atlantic rainforest. **Sociobiology**, v. 61, n. 2, p. 178-183, 2014.

MOREIRA, T. C. L. et al. Intra-urban biomonitoring: Source apportionment using tree barks to identify air pollution sources. **Environment International**, v. 91, p. 271-275, 2016.

MOREIRA, T. C. L. et al. The use of tree barks to monitor traffic related air pollution: a case study in São Paulo-Brazil. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, p. 72, 2018.

MUÑOZ, A. A. et al. Multidecadal environmental pollution in a mega-industrial area in central Chile registered by tree rings. **Science of the Total Environment**, v. 696, p. 133915, 2019.

NABAIS, C.; FREITAS, H.; HAGEMEYER, J. Dendroanalysis: a tool for biomonitoring environmental pollution?. **Science of the total environment**, v. 232, n. 1-2, p. 33-37, 1999.

NAGAJYOTI, P. C; LEE, K. D; SREEKANTH, T. V. M. Heavy metals, occurrence, and toxicity for plants: a review. **Environmental chemistry letters**, v. 8, n. 3, p. 199-216, 2010.

NOWAK, David J. et al. Modeled PM<sub>2.5</sub> removal by trees in ten US cities and associated health effects. **Environmental pollution**, v. 178, p. 395-402, 2013.

ODABASI, M. et al. Investigation of spatial and historical variations of air pollution around an industrial region using trace and macro elements in tree components. **Science of the Total Environment**, v. 550, p. 1010-1021, 2016.

PALMEIRA, A. F. **A nova face da “Cidade do Aço”: crise do capital, Trabalho e Hegemonia em Volta Redonda (1992-2008)**. 2012. Dissertação (Mestrado em História Social) – Instituto de Ciências Humanas e Filosofia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2012.

PAOLETTI, E. Ozone and urban forests in Italy. **Environmental pollution**, v. 157, n. 5, p. 1506-1512, 2009.

PEITER, P; TOBAR, C. Poluição do ar e condições de vida: uma análise geográfica de riscos à saúde em Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil. **Cadernos de saúde pública**, v. 14, p. 473-485, 1998.

PERONE, A. et al. Oak tree-rings record spatial-temporal pollution trends from different sources in Terni (Central Italy). **Environmental Pollution**, v. 233, p. 278-289, 2018.

PIERANGELI, M. A. P. et al. Adsorção e dessorção de cádmio, cobre e chumbo por amostras de Latossolos pré-tratadas com fósforo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 377-384, 2004.

PIQUERAS, S. et al. Understanding the formation of heartwood in larch using synchrotron infrared imaging combined with multivariate analysis and atomic force microscope infrared spectroscopy. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, p. 1701, 2020.

PRAJAPATI, S. K. Ecological effect of airborne particulate matter on plants. **Environmental Skeptics and Critics**. 1, pp. 12–22, 2012.

PRETZSCH, H. et al. Climate change accelerates growth of urban trees in metropolises worldwide. **Scientific reports**, v. 7, n. 1, p. 1-10, 2017.

PRITCHETT, W. L.; FISCHER, R. F. Tropical Forest Soils. **Properties and Management of Forest Soils**, Wiley Sons J. (Ed.), 2nd ed., New York, p. 308-328, 1987.

RADHA, J.; SRIVASTAVA, S.; MADAN, V. Influence of chromium on growth and cell division of sugarcane. **Indian Journal of Plant Physiology**, v. 5, n. 3, p. 228-231, 2000.

RAI, P. K. Impacts of particulate matter pollution on plants: Implications for environmental biomonitoring. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 129, p. 120-136, 2016.

REHMAN, A. U. et al. Toxicity of heavy metals in plants and animals and their uptake by magnetic iron oxide nanoparticles. **Journal of Molecular Liquids**, v. 321, p. 114455, 2021.

RIBEIRO, R. T. M.; MARQUET, N.; LOIOLA, M. I. B. **Combretaceae in Flora do Brasil 2020**. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/reflora/floradobrasil/FB6913>>. Acesso em: 17 Jun. 2022.

RICO, C. M.; MAJUMDAR, S.; DUARTE-GARDEA, M.; PERALTA-VIDEA, J. R.; GARDEA-TORRESDEY, J. L. Interaction of nanoparticles with edible plants and their possible implications in the food chain. **J Agric Food Chem**, 59:3485–3498, 2011.

ROCHA, N. L. T.; GUIMARÃES, C. S. Estudo da qualidade do ar e a atividade siderúrgica na cidade de Volta Redonda. **Cadernos UniFOA**, v. 12, n. 33, p. 25-36, 2017.

ROELAND, S. et al. Towards an integrative approach to evaluate the environmental ecosystem services provided by urban forest. **Journal of Forestry Research**, p. 1-16, 2019.

RUWANPATHIRANA, N. D. Use of wood characters in the Identification of *Terminalia* spp in Sri Lanka. **Journal of Tropical Forestry and Environment**, v. 4, n. 2, 2014.

SANDERS, T. et al. Neurotoxic effects and biomarkers of lead exposure: a review. **Reviews on environmental health**, v. 24, n. 1, p. 15-46, 2009.

SÄUMEL, I. et al. How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. **Environmental Pollution**, v. 165, p. 124-132, 2012.

SAWIDIS, T. et al. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. **Environmental pollution**, v. 159, n. 12, p. 3560-3570, 2011.

SCHARNWEBER, T. et al. Common trends in elements? Within-and between-tree variations of wood-chemistry measured by X-ray fluorescence—A dendrochemical study. **Science of the Total Environment**, v. 566, p. 1245-1253, 2016.

SCHULZ, M. et al. Atmospheric transport and deposition of mineral dust to the ocean: Implications for research needs. **Environmental science & technology**, v. 46, n. 19, p. 10390-10404, 2012.

SENSUŁA, B. et al. Variations of tree ring width and chemical composition of wood of pine growing in the area nearby chemical factories. **Geochronometria**, v. 44, n. 1, p. 226-239, 2017.

SGRIGNA, G.; BALDACCHINI, C.; DREVECK, S.; CHENG, Z.; CALFAPIETRA, C. Relationships between air particulate matter capture efficiency and leaf traits in twelve tree species from an Italian urban-industrial environment. **Science of The Total Environment**, v. 718, p. 137310, 2020.

SHAHID, M. et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: a review. **Soil and Sediment Contamination: An International Journal**, v. 23, n. 4, p. 389-416, 2014.

SHIRAIWA, Manabu et al. Aerosol health effects from molecular to global scales. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 23, p. 13545-13567, 2017.

SICARD, P.; AGATHOKLEOUS, E.; ARAMINIENE, V.; CARRARI, E.; HOSHIKA, Y.; DE MARCO, A.; PAOLETTI, E. Should we see urban trees as effective solutions to increasing ozone levels in cities? **Environmental Pollution**, 243, 163–176, 2018.

SILVA, G. C. **As relações entre a saúde e a exposição aos resíduos siderúrgicos: o conflito socioambiental no Volta Grande IV, a partir dos seus moradores. 2019.** Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca, Fundação Oswaldo Cruz, Rio de Janeiro, 2019.

SINGH, M. K.; SHARMA, M. B.; SHARMA, C. L. Wood anatomical variations in some *Terminalia* species of Assam. **International Journal of Botany and Research**, v. 3, n. 2, p. 13-18, 2013.

SOUZA, M.S.P.A. et al. *Poincianella pluviosa* as biomonitor of heavy metals in the municipality of Volta Redonda, RJ, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**, v. 23, n. 1, 2019.

SPEER, J. H. **Fundamentals of tree-ring research.** University of Arizona Press, 2010.

- STAHLÉ, D. W. et al. Management implications of annual growth rings in *Pterocarpus angolensis* from Zimbabwe. **Forest Ecology and Management**, v. 124, n. 2-3, p. 217-229, 1999.
- STANKOVIC, S.; KALABA, P.; STANKOVIC, A.R. Biota as toxic metal indicators. **Environmental Chemistry Letters**, v. 12, p. 63–84, 2014.
- STEWART, C. M. Excretion and Heartwood Formation in Living Trees: The death of many cells in secondary tissues seems to result from the accumulation of waste metabolites. **Science**, v. 153, n. 3740, p. 1068-1074, 1966.
- SUKREYAPONGSE, O. et al. pH-dependent release of cadmium, copper, and lead from natural and sludge-amended soils. **Journal of Environmental Quality**, 31,1901-1909, 2002.
- SUZUKI, K. Characterization of airborne particulates and associated trace metals deposited on tree bark by ICP-OES, ICP-MS, SEM-EDX and laser ablation ICP-MS. **Atmospheric Environment**, v. 40, n. 14, p. 2626-2634, 2006.
- SYTAR, O. et al. Heavy metal-induced oxidative damage, defense reactions, and detoxification mechanisms in plants. **Acta physiologiae plantarum**, v. 35, n. 4, p. 985-999, 2013.
- SZCZEPANIAK, K.; BIZIUK, M. Aspects of the biomonitoring studies using mosses and lichens as indicators of metal pollution. **Environmental research**, v. 93, n. 3, p. 221-230, 2003.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4 ed. Porto Alegre: Artmed, 679 p., 2013.
- TAKEBAYASHI, H.; SENOO, M. Analysis of the relationship between urban size and heat island intensity using WRF model. **Urban climate**, v. 24, p. 287-298, 2018.
- THOMSON, L.A.J; EVANS, B. *Terminalia catappa* (tropical almond). **Species Profiles for Pacific Island Agroforestry**, v. 2, p. 1-20, 2006.
- TOMAZELLO FILHO, M.; BOTOSSO, P. C.; LISI, C. S. Análise e aplicação dos anéis de crescimento das árvores como indicadores ambientais: dendrocronologia e dendroclimatologia. **Indicadores ambientais: conceitos e aplicações**. São Paulo: Educ, p. 117-143, 2001.
- TROUET, V.; ESPER, J.; BEECKMAN, H. Climate/growth relationships of *Brachystegia spiciformis* from the miombo woodland in south central Africa. **Dendrochronologia**, v. 28, n. 3, p. 161-171, 2010.
- TSAI, J. et al. Chemical constituents in particulate emissions from an integrated iron and steel facility. **Journal of hazardous materials**, v. 147, n. 1-2, p. 111-119, 2007.
- UKPEBOR, E. E. et al. *Delonix regia* and *Casuarina equisetifolia* as passive biomonitor and as bioaccumulators of atmospheric trace metals. **Journal of Environmental Sciences**, v.22, p.1073-1079, 2010.

URBINATI, C. V. et al. Wood structural quantitative variation of the *Terminalia ivorensis* A. Chev., Combretaceae. **Acta Botânica Brasilica**, v. 17, p. 421-437, 2003.

USMAN, A. R. A.; KUZYAKOV, Y.; STAHR, K. **Sorption, desorption, and immobilization of heavy metals by artificial soil**. MSc. thesis, University of Hohenheim, Stuttgart, 2008.

VAGANOV, E. A. et al. Dendroclimatology, developments in paleoenvironmental research. **How well understood are the processes that create dendroclimatic records? A mechanistic model of the climatic control on conifer tree-ring growth dynamics**, v. 11, p. 37-75, 2011.

VALVERDE, M. C. et al. Urban climate assessment in the ABC Paulista Region of São Paulo, Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 735, p. 139303, 2020.

VAN VLIET, G. J. C. M. **Wood anatomy of the Combretaceae**. Blumea 25: 141-223, 1979.

VASCONCELLOS, T. J. de; CUNHA, M. da; CALLADO, C. H. A comparative study of cambium histology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) under urban pollution. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 24, n. 13, p. 12049-12062, 2017.

VASCONCELLOS, T. J. de; TOMAZELLO-FILHO, M.; CALLADO, C. H.. Dendrochronology and dendroclimatology of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna (Malvaceae) exposed to urban pollution in Rio de Janeiro city, Brazil. **Dendrochronologia**, v. 53, p. 104-113, 2019.

VASCONCELLOS, T. J.; CALLADO, C. H. Wood anatomy of *Ceiba speciosa* (A. St.-Hil.) Ravenna under urban pollution. **IAWA journal**, v. 41, n. 1, p. 30-47, 2020.

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

VOLNÁ, V.; BLAŽEK, Z.; KREJČÍ, B. Assessment of air pollution by PM<sub>10</sub> suspended particles in the urban agglomeration of Central Europe in the period from 2001 to 2018. **Urban Climate**, v. 39, p. 100959, 2021.

WANG, J. H. C.; TSAI, C. T.; CHIANG, C. F. Screening procedure for airborne pollutants emitted from a high-techindustrial complex in Taiwan. **Chemosphere**, v.139, p. 268–275. 2015.

WANG, P. et al. Nanotechnology: a new opportunity in plant sciences. **Trends in plant science**, v. 21, n. 8, p. 699-712, 2016.

WATMOUGH, S.A., HUTCHINSON, T.C., EVANS, R.D. Application of laser ablation inductively coupled plasma-mass spectrometry in dendrochemical analysis. **Environmental Science; Technology**, v. 31, p. 114-118.1997.

WHO, World Health Organization; Air Quality Guidelines, 2nd Edition, Regional Office for Europe, 2000.

WIGLEY, T. M. L.; BRIFFA, K. R.; JONES, P. D. On the average value of correlated time series, with applications in dendroclimatology and hydrometeorology. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 23, n. 2, p. 201-213, 1984.

XU, H. et al. Differences in quantity and composition of leaf particulate matter and morphological structures in three evergreen trees and their association in Harbin, China. **Environmental Pollution**, v. 252, p. 1772-1790, 2019.

YUN, G. Y. et al. Predicting the magnitude and the characteristics of the urban heat island in coastal cities in the proximity of desert landforms. The case of Sydney. **Science of The Total Environment**, v. 709, p. 136068, 2020.

ZAR, J.H. Biostatistical Analysis. **Prentice Hall**, New Jersey, 2010. 947 p.

ZHANG, G. et al. The impact of air pollution on individual subjective well-being: Evidence from China. **Journal of Cleaner Production**, v. 336, p. 130413, 2022.

ZHANG, X. The history of pollution elements in Zhengzhou, China recorded by tree rings. **Dendrochronologia**, v. 54, p. 71-77, 2019.

**APÊNDICE A – DADOS DENDROMÉTRICOS DAS ÁRVORES AMOSTRADAS NAS REGIÕES DE VOLTA REDONDA (NOROESTE E SUDESTE) E RESENDE**

**Tabela 3.** Dados dendrométricos das árvores de *T. catappa* na região noroeste.

Região Noroeste (NO)					
Árvore	Idade (anos)	Altura (m)	DAP (cm)	IRA (mm)	IRMA (mm)
1	52	12,0	38,80	111,41	2,13
2	34	6,0	22,92	65,31	2,00
3	55	8,3	30,88	134,70	2,53
4	65	7,8	23,55	99,83	1,54
5	54	6,0	31,83	118,93	2,35
6	96	11,0	68,12	246,00	2,33
7	58	10,0	56,34	195,16	2,78
8	73	7,4	48,70	195,85	2,34
9	58	8,0	44,56	201,51	2,85
10	44	9,5	35,81	136,23	2,87
11	68	10,0	59,59	250,35	2,86
12	48	8,0	28,65	163,91	2,98
13	40	7,0	36,92	127,47	2,80
14	58	6,0	42,18	165,39	2,27
15	70	6,5	40,08	167,85	2,14
16	74	12,0	48,70	173,79	2,54
17	42	10,0	33,74	131,40	2,61
18	27	7,5	28,97	91,15	3,08
19	33	9,0	26,42	112,85	2,77
20	26	8,5	32,15	105,69	3,00
21	42	7,0	36,29	152,37	2,87
22	32	8,0	31,83	120,09	3,08
23	35	8,0	30,11	115,99	2,84
24	37	5,5	30,84	132,52	3,08
25	39	12,0	43,93	159,78	3,35
26	63	10,0	49,66	201,32	3,20
27	44	8,0	48,77	171,68	3,21
28	46	9,0	51,88	210,01	3,75
29	54	11,5	55,39	208,42	3,17
30	56	12,0	58,09	207,03	3,36
31	43	6,5	46,47	194,82	3,67
32	58	9,0	47,75	208,32	3,13
Média	50	8,7	40,93	158,66	2,80

**Tabela 4.** Dados dendrométricos das árvores de *T. catappa* na região sudeste.

Região Sudeste (SE)					
Árvore	Idade (anos)	Altura (m)	DAP (cm)	IRA (mm)	IRMA (mm)
1	65	14,0	51,88	225,33	3,24
2	49	18,0	56,02	213,86	3,67
3	46	12,0	46,47	190,94	3,19
4	45	14,0	38,52	170,91	3,16
5	41	15,0	45,84	184,00	3,61
6	27	12,0	40,74	256,44	3,38
7	43	11,0	44,25	150,46	2,73
8	45	12,0	44,56	177,21	2,55
9	35	13,0	45,20	128,10	3,24
10	71	10,0	50,29	100,29	3,45
11	41	13,0	28,65	114,58	2,15
12	60	10,0	35,33	136,92	2,67
13	34	11,0	30,88	127,85	2,68
14	59	13,0	48,06	188,59	2,81
15	33	6,0	32,79	107,64	2,65
16	39	5,0	38,20	123,11	3,02
17	28	14,0	43,61	138,51	3,49
18	48	10,0	39,79	144,73	2,39
19	42	12,0	48,38	131,56	2,55
20	60	11,0	53,16	199,47	3,12
21	51	12,0	46,79	191,22	3,06
22	38	6,0	31,19	128,38	2,61
23	59	9,5	47,11	178,48	2,74
24	77	14,0	54,43	217,19	2,79
Média	47	11,6	43,42	163,57	2,96

**Tabela 5.** Dados dendrométricos das árvores de *T. catappa* em Resende.

Resende					
Árvore	Idade (anos)	Altura (m)	DAP (cm)	IRA (mm)	IRMA (mm)
1	54	10,0	60,16	186,48	3,56
2	89	13,0	53,79	252,80	2,86
3	71	11,0	54,11	278,72	3,96
4	46	9,0	38,52	175,20	3,85
5	45	9,0	34,38	146,23	3,26
6	54	8,5	45,52	189,62	3,53
7	57	10,0	38,20	172,13	3,06
8	56	11,0	63,66	197,13	3,52
9	46	9,5	45,20	170,53	3,86
10	55	11,5	53,16	213,74	3,88
11	74	9,5	57,30	232,03	3,16
Média	59	10,2	49,45	201,33	3,50

## APÊNDICE B – CONCENTRAÇÃO DOS ELEMENTOS ACUMULADOS NA MADEIRA E NAS CASCAS DA ESPÉCIE *Terminalia catappa* NAS DIFERENTES REGIÕES E NOS DIFERENTES PERÍODOS DO CRESCIMENTO

**Tabela 6.** Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de *T. catappa* ( $\pm$  desvio padrão) e valores de significância entre os locais de estudo (Resende, Volta Redonda e regiões SE e NO).

Elementos	Concentração dos elementos acumulados na madeira em mg/kg					
	Resende	Volta Redonda	p-valor	SE	NO	p-valor
<b>Al</b>	137,06 $\pm$ 89,62	164,62 $\pm$ 136,65	0,54	183,47 $\pm$ 160,32	145,78 $\pm$ 106,01	0,13
<b>Fe</b>	23,55 $\pm$ 23,35	17,56 $\pm$ 19,45	0,35	14,36 $\pm$ 14,22	20,75 $\pm$ 23,24	<b>0,04</b>
<b>Zn</b>	4,12 $\pm$ 2,42	6,47 $\pm$ 6,22	0,13	7,38 $\pm$ 7,45	5,57 $\pm$ 4,56	<b>0,02</b>
<b>Mn</b>	5,05 $\pm$ 1,62	3,81 $\pm$ 2,97	<b>0,01</b>	3,53 $\pm$ 3,44	4,09 $\pm$ 2,42	0,10
<b>Cu</b>	3,35 $\pm$ 0,89	3,07 $\pm$ 1,17	0,24	2,92 $\pm$ 1,13	3,21 $\pm$ 1,20	0,19
<b>Pb</b>	2,70 $\pm$ 0,71	2,45 $\pm$ 1,52	0,15	1,94 $\pm$ 1,03	2,97 $\pm$ 1,75	<b>0,00</b>
<b>Ni</b>	0,97 $\pm$ 0,74	1,21 $\pm$ 0,94	0,52	1,23 $\pm$ 0,77	1,20 $\pm$ 1,10	0,71
<b>Cr</b>	1,35 $\pm$ 0,41	0,84 $\pm$ 0,52	<b>0,00</b>	1,03 $\pm$ 0,56	0,65 $\pm$ 0,39	<b>0,00</b>
<b>As</b>	0,17 $\pm$ 0,06	0,38 $\pm$ 0,21	<b>0,00</b>	0,42 $\pm$ 0,21	0,34 $\pm$ 0,19	0,11
<b>Cd</b>	0,23 $\pm$ 0,10	0,17 $\pm$ 0,12	0,06	0,17 $\pm$ 0,11	0,17 $\pm$ 0,14	0,66

Nota: Valores em negrito representam diferença estatística a um nível de significância de 0,05.

**Tabela 7.** Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de *T. catappa* ( $\pm$  desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores de Resende.

Elementos	Concentrações na madeira em diferentes períodos do crescimento (mg/kg)			
	Resende			p-valor
	PI (1949-1972)	PII (1973-1995)	PIII (1996-2018)	
<b>Al</b>	177,58 $\pm$ 73,79	41,74 $\pm$ 18,83	191,88 $\pm$ 71,73	<b>0,01</b>
<b>Fe</b>	16,99 $\pm$ 19,49	28,17 $\pm$ 26,03	25,47 $\pm$ 27,67	0,92
<b>Zn</b>	4,55 $\pm$ 2,05	2,62 $\pm$ 2,19	5,19 $\pm$ 2,64	0,23
<b>Mn</b>	5,84 $\pm$ 2,30	4,03 $\pm$ 0,81	5,28 $\pm$ 1,03	0,23
<b>Cu</b>	3,76 $\pm$ 0,21	2,26 $\pm$ 0,56	4,05 $\pm$ 0,32	<b>0,00</b>
<b>Pb</b>	2,70 $\pm$ 0,80	2,80 $\pm$ 0,77	2,61 $\pm$ 0,73	0,93
<b>Ni</b>	1,52 $\pm$ 0,96	0,45 $\pm$ 0,28	0,93 $\pm$ 0,45	0,06
<b>Cr</b>	1,61 $\pm$ 0,21	1,05 $\pm$ 0,51	1,38 $\pm$ 0,32	0,10
<b>As</b>	0,15 $\pm$ 0,03	0,22 $\pm$ 0,07	0,13 $\pm$ 0,05	0,08
<b>Cd</b>	0,25 $\pm$ 0,05	0,13 $\pm$ 0,09	0,30 $\pm$ 0,07	<b>0,01</b>

Nota: Valores em negrito representam diferença estatística a um nível de significância de 0,05.

**Tabela 8.** Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de *T. catappa* ( $\pm$  desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores de Volta Redonda.

Elementos	Concentrações na madeira em diferentes períodos do crescimento (mg/kg)			
	Volta Redonda			
	PI (1962-1978)	PII (1979-1996)	PIII (1997-2018)	p-valor
<b>Al</b>	199,34 $\pm$ 141,13	63,09 $\pm$ 40,46	231,44 $\pm$ 137,96	<b>0,00</b>
<b>Fe</b>	20,71 $\pm$ 17,72	10,03 $\pm$ 15,58	21,92 $\pm$ 22,57	<b>0,00</b>
<b>Zn</b>	6,30 $\pm$ 4,79	5,00 $\pm$ 4,14	8,12 $\pm$ 8,53	<b>0,04</b>
<b>Mn</b>	3,93 $\pm$ 2,23	3,38 $\pm$ 4,18	4,12 $\pm$ 2,05	<b>0,01</b>
<b>Cu</b>	3,04 $\pm$ 1,43	2,90 $\pm$ 0,70	3,26 $\pm$ 1,25	0,10
<b>Pb</b>	2,57 $\pm$ 1,62	2,26 $\pm$ 1,37	2,54 $\pm$ 1,58	0,70
<b>Ni</b>	1,50 $\pm$ 0,85	0,48 $\pm$ 0,54	1,66 $\pm$ 0,92	<b>0,00</b>
<b>Cr</b>	0,80 $\pm$ 0,53	0,65 $\pm$ 0,37	1,08 $\pm$ 0,55	<b>0,00</b>
<b>As</b>	0,39 $\pm$ 0,21	0,33 $\pm$ 0,17	0,42 $\pm$ 0,23	0,72
<b>Cd</b>	0,14 $\pm$ 0,07	0,16 $\pm$ 0,15	0,2 $\pm$ 1,43	<b>0,02</b>

Nota: Valores em negrito representam diferença estatística a um nível de significância de 0,05.

**Tabela 9.** Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de *T. catappa* ( $\pm$  desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores da região SE.

Elementos	Concentrações na madeira em diferentes períodos do crescimento (mg/kg)			
	SE			
	PI (1964-1979)	PII (1980-1997)	PIII (1998-2018)	p-valor
<b>Al</b>	220,93 $\pm$ 141,26	62,98 $\pm$ 46,34	266,49 $\pm$ 183,58	<b>0,00</b>
<b>Fe</b>	19,31 $\pm$ 18,68	10,17 $\pm$ 11,12	13,61 $\pm$ 10,48	0,13
<b>Zn</b>	7,29 $\pm$ 5,61	5,47 $\pm$ 4,69	9,38 $\pm$ 10,53	0,30
<b>Mn</b>	3,44 $\pm$ 1,52	3,58 $\pm$ 5,60	3,57 $\pm$ 1,74	0,10
<b>Cu</b>	2,91 $\pm$ 1,38	2,78 $\pm$ 0,59	3,08 $\pm$ 1,29	0,87
<b>Pb</b>	1,89 $\pm$ 0,87	1,74 $\pm$ 0,78	2,2 $\pm$ 1,35	0,36
<b>Ni</b>	1,6 $\pm$ 0,71	0,42 $\pm$ 0,18	1,67 $\pm$ 0,48	<b>0,00</b>
<b>Cr</b>	1,01 $\pm$ 0,57	0,85 $\pm$ 0,42	1,24 $\pm$ 0,63	0,17
<b>As</b>	0,44 $\pm$ 0,21	0,34 $\pm$ 0,17	0,49 $\pm$ 0,23	0,08
<b>Cd</b>	0,15 $\pm$ 0,07	0,16 $\pm$ 0,14	0,19 $\pm$ 0,12	0,69

Nota: Valores em negrito representam diferença estatística a um nível de significância de 0,05.

**Tabela 10.** Valores das concentrações dos elementos detectados na madeira de *T. catappa* ( $\pm$  desvio padrão) e valores de significância entre os períodos do crescimento das árvores da região NO.

Elementos	Concentrações na madeira em diferentes períodos do crescimento (mg/kg)			
	NO			
	PI (1961-1977)	PII (1978-1994)	PIII (1995-2018)	p-valor
<b>Al</b>	177,76 $\pm$ 141,24	63,19 $\pm$ 34,83	196,4 $\pm$ 52,74	<b>0,00</b>
<b>Fe</b>	22,12 $\pm$ 17,07	9,89 $\pm$ 19,35	30,23 $\pm$ 28,12	<b>0,00</b>
<b>Zn</b>	5,32 $\pm$ 3,69	4,53 $\pm$ 3,58	6,86 $\pm$ 5,93	0,52
<b>Mn</b>	4,41 $\pm$ 2,72	3,18 $\pm$ 2,11	4,67 $\pm$ 2,24	0,10
<b>Cu</b>	3,17 $\pm$ 1,51	3,02 $\pm$ 0,79	3,43 $\pm$ 1,22	0,55
<b>Pb</b>	3,24 $\pm$ 1,92	2,78 $\pm$ 1,64	2,88 $\pm$ 1,75	0,46
<b>Ni</b>	1,41 $\pm$ 0,98	0,54 $\pm$ 0,75	1,64 $\pm$ 1,23	<b>0,00</b>
<b>Cr</b>	0,6 $\pm$ 0,41	0,44 $\pm$ 0,14	0,92 $\pm$ 0,41	<b>0,00</b>
<b>As</b>	0,33 $\pm$ 0,20	0,33 $\pm$ 0,17	0,35 $\pm$ 0,22	0,94
<b>Cd</b>	0,13 $\pm$ 0,07	0,16 $\pm$ 0,17	0,21 $\pm$ 0,14	0,07

Nota: Valores em negrito representam diferença estatística a um nível de significância de 0,05.

**Tabela 11.** Valores das concentrações dos elementos detectados na casca de *T. catappa* ( $\pm$  desvio padrão) e valores de significância entre os locais de estudo (Resende, Volta Redonda e regiões SE e NO).

Elementos	Concentração acumulada na casca em mg/kg					
	Resende	Volta Redonda	p-valor	SE	NO	p-valor
<b>Al</b>	303,24 $\pm$ 122,78	246,59 $\pm$ 137,50	0,30	229,25 $\pm$ 127,68	263,93 $\pm$ 147,89	0,70
<b>Fe</b>	163,39 $\pm$ 88,42	790,4 $\pm$ 906,09	0,16	844,13 $\pm$ 886,11	736,67 $\pm$ 945,48	0,22
<b>Zn</b>	16,04 $\pm$ 3,47	24,10 $\pm$ 12,65	0,17	25,48 $\pm$ 11,97	22,72 $\pm$ 13,46	0,25
<b>Mn</b>	38,73 $\pm$ 15,80	40,56 $\pm$ 22,47	0,86	42,12 $\pm$ 22,03	39,00 $\pm$ 23,37	0,67
<b>Cu</b>	3,93 $\pm$ 0,72	3,30 $\pm$ 1,15	0,07	3,36 $\pm$ 0,42	3,24 $\pm$ 1,59	0,23
<b>Pb</b>	0,42 $\pm$ 0,24	2,38 $\pm$ 7,60	<b>0,05</b>	3,34 $\pm$ 10,72	1,42 $\pm$ 1,38	0,39
<b>Ni</b>	1,14 $\pm$ 1,23	1,49 $\pm$ 1,02	0,39	1,75 $\pm$ 1,09	1,24 $\pm$ 0,91	0,12
<b>Cr</b>	1,16 $\pm$ 0,24	0,94 $\pm$ 0,54	0,38	1,17 $\pm$ 0,50	0,72 $\pm$ 0,50	<b>0,01</b>
<b>As</b>	0,46 $\pm$ 0,19	1,99 $\pm$ 2,47	0,73	0,34 $\pm$ 0,22	3,65 $\pm$ 2,59	<b>0,00</b>
<b>Cd</b>	0,53 $\pm$ 0,21	0,16 $\pm$ 0,11	<b>0,00</b>	0,17 $\pm$ 0,07	0,15 $\pm$ 0,13	0,06

Nota: Valores em negrito representam diferença estatística a um nível de significância de 0,05.