



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E  
COMUNICAÇÃO

Douglas Waltricke Freitas

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DO MOMENTO IDEAL DE PODA EM  
REGIÕES ARBÓREAS**

Araranguá  
2023

Douglas Waltricke Freitas

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DO MOMENTO IDEAL DE PODA EM  
REGIÕES ARBÓREAS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador(a): Prof. Roderval Marcelino, Dr.

[Araranguá]

[2023]

Ficha de identificação de obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária UFSC.

Freitas, Douglas  
Metodologia para predição do momento ideal de poda em regiões arbóreas / Douglas Freitas ; orientador, Roderval Marcelino, 2023.  
50 p.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação, Araranguá, 2023.

Inclui referências.

1. Tecnologias da Informação e Comunicação. 2. Metodologia gestão de poda. . 3. Gestão de poda. . 4. Energia elétrica.. 5. Interrupção fornecimento energia elétrica.. I. Marcelino, Roderval . II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias da Informação e Comunicação. III. Título.

Douglas Waltricke Freitas

**METODOLOGIA PARA PREDIÇÃO DO MOMENTO IDEAL DE PODA EM  
REGIÕES ARBOAREAS**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Eliane Pozzebon, Dr  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Wilson Gruber, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Gustavo dos Santos De Lucca Dr.  
UniSATC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de “MestrE”

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a  
assinatura digital

Prof.(a) Roderval Marcelino, Dr.(a)  
Orientador(a)

Araranguá, 2023.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por tudo e por tanto. Meu muito obrigado para meus pais Silvio Freitas e Rita Waltricke e meu irmão Guilherme Waltricke, que desde sempre me apoiaram de todas as formas possíveis e certamente não teria conseguido sem eles. Meus agradecimentos também ao professor Prof. Dr. Roderval Marcelino que me guiou de forma extremamente solícita por toda essa jornada e aos demais docentes do PPGTIC que me tornaram um cientista e ser humano melhor ao longo desse processo. Agradeço também a todo time de pesquisa da SATC e da CEEE-D que apoiaram o projeto com dados e expertise.

## RESUMO

Em média, 70% dos desligamentos de energia elétrica no Brasil são ocasionados por conflitos entre vegetação arbórea e a rede elétrica, esta casualidade custa todos os anos milhões para o setor elétrico, além de gerar um descontentamento dos consumidores. Além disso, estudos apontam que podas em demasia e desnecessárias, geram um alto impacto ambiental e social. Desta forma, visando mitigar tais prejuízos financeiros e ambientais, o presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para predição do momento ideal de poda. A metodologia conta com a obtenção de uma fórmula de crescimento da espécie escolhida para a simulação e aferição, através de um time de campo que observou o crescimento da espécie e desenvolveu uma fórmula de crescimento. O time de campo foi composto e gerenciado pela UniSATC em parceria com a CEEE-D (Companhia Estatal de Distribuição de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul), eles também participaram ativamente do projeto fornecendo e validando informações. Após obtenção dos dados, foram tratados usando a linguagem *Python*, para normalização e para a redução do erro. Testes foram realizados em um cenário simulado. A aferição dos resultados também fora feita em cenário simulado, através dos algoritmos de erro médio absoluto (MAE), erro médio quadrático (MSE) e erro quadrático médio (RMSE). Com a metodologia desenvolvida foi possível identificar qual tamanho limite de crescimento para determinada arborização e em quantos meses ela precisaria de uma poda preventiva, baseado seu crescimento e limite de altura de acordo a rede elétrica próxima e de potencial conflito. Ao adotar essa metodologia, espera-se que as ocorrências de quedas de energia e o impacto negativo da poda excessiva possam ser significativamente reduzidos, contribuindo para um sistema de distribuição elétrica mais sustentável e confiável.

**Palavras-chave:** Metodologia gestão de poda. Gestão de poda. Energia elétrica. Interrupção fornecimento energia elétrica.

## ABSTRACT

On average, 70% of electricity shutdowns in Brazil are caused by conflicts between tree vegetation and the electricity grid. This incident costs the electricity sector millions every year, in addition to generating consumer discontent. Furthermore, studies show that excessive and unnecessary pruning generates a high environmental and social impact. Therefore, aiming to mitigate such financial and environmental losses, the present work aims to develop a methodology for predicting the ideal time for pruning. The methodology relies on obtaining a growth formula for the species chosen for simulation and measurement, through a field team that observed the growth of the species and developed a growth formula. The field team was composed and managed by UniSATC in partnership with CEEE-D (Rio Grande do Sul State Electricity Distribution Company), they also actively participated in the project by providing and validating information. After obtaining the data, it was processed using the Python language, for normalization and error reduction. Tests were carried out in a simulated scenario. The results were also measured in a simulated scenario, using the mean absolute error (MAE), mean squared error (MSE) and mean squared error (RMSE) algorithms. With the methodology developed, it was possible to identify the growth limit size for a given afforestation and in how many months it would need preventive pruning, based on its growth and height limit according to the nearby electrical network and potential conflict. By adopting this methodology, it is expected that the occurrences of power outages and the negative impact of excessive pruning can be significantly reduced, contributing to a more sustainable and reliable electrical distribution system.

**Keywords:** Pruning management system. Pruning management management. Pruning management methodology. Pruning management. Electricity. Electrical faults.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Etapas de desenvolvimento da metodologia .....	24
Figura 2 - Por tipo de documento .....	24
Figura 3 - por ano de publicação .....	24
Figura 4 – Publicação por coleção.....	25
Figura 5 – Por tipo de documento .....	25
Figura 6 – Por ano de publicação .....	25
Figura 7 – Etapas de desenvolvimento da metodologia .....	20
Figura 8 – Colunas/propriedades do dataset de arborização urbana .....	28
Figura 9 – Remoção de colunas com mais de 20% de dados nulos .....	29
Figura 10 – Ocorrência registradas pela CEEE-D.....	29
Figura 11 – Dicionário de dados das ocorrências fornecido pela CEEE-D.....	30
Figura 12 – Remoção das ocorrências sem geolocalização.....	31
Figura 13 – Quantidade x Altura das árvores observadas .....	31
Figura 14 – Quantidade de árvores observadas por espécie.....	32
Figura 15 – Contagem e agrupamentos das árvores por família .....	33
Figura 16 – Contagem e agrupamento das árvores por origem.....	33
Figura 17 – Pontos azuis representando as ocorrências no mapa da região .....	34
Figura 18 – Ocorrências x arborizações urbanas registradas na região.....	35
Figura 19 – Ocorrência x Arborização mais próxima .....	36
Figura 20 – Observação do crescimento ao longo de 12 campanhas .....	37
Figura 21 – Aplicação de equação linear para crescimento da Jacarandá.....	38
Figura 22 - Aplicação de equação logarítmica para crescimento da Jacarandá .....	38
Figura 23 - Aplicação de equação polinomial de segunda ordem para crescimento da Jacarandá. .....	39
Figura 25 – Ilustrando o crescimento de uma vegetação.....	39
Figura 26 – Redes elétricas em conflito com arborizações .....	40
Figura 27 – Altura e distância da rede suas classes.....	41
Figura 28 – Definição das árvores de Jacarandá com potencial conflito com a rede elétrica baseado em sua distância para com a rede .....	41
Figura 29 – Novos campos no dataset de arborização urbana.....	42
Figura 30 – definição dos limites de altura para ativar um evento de poda .....	43
Figura 31 – Amostragem de árvores com altura atual x altura limite .....	43



Figura 32 – Aplicando a taxa de crescimento e ativando um evento de poda quando o limite é atingido. ....	44
Figura 33 – Gráfico para predição do momento ideal de poda .....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métricas de avaliação .....	47
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEEE-D	Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul
MAE	Erro médio quadrático
MSE	Erro médio quadrático
RMSE	Erro quadrático médio
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
O <sub>2</sub>	Oxigênio
BT	Baixa Tensão
MT	Média Tensão
PPGTIC	Programa de Pós-Graduação em Tecnologia da Informação e Comunicação
IEEE	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
COELCE	Companhia de Energia do Ceará
CELESC	Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A
UNESP	Universidade Federal Paulista
LiDAR	Laser de detecção e intervalo
GIS	Sistemas de informações geográficas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	OBJETIVOS .....	18
1.1.1	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>18</b>
1.1.2	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>18</b>
1.1.3	<b>Justificativa .....</b>	<b>18</b>
1.2	ADERÊNCIA DO OBJETO DE PESQUISA AO PPGTIC .....	19
1.3	METODOLOGIA.....	19
1.3.1	<b>Normalização dos dados.....</b>	<b>20</b>
1.3.2	<b>Análise descritiva e quantitativa dos dados .....</b>	<b>20</b>
1.3.3	<b>Desenvolvimento do algoritmo .....</b>	<b>21</b>
1.3.4	<b>Aferição dos resultados .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>22</b>
2.1	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	22
2.2	PROCEDIMENTOS ADOTADOS.....	22
2.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	23
2.4	ANÁLISE DESCRITIVA .....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DESENVOLVIDA .....</b>	<b>28</b>
3.1	NORMALIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS .....	28
3.2	ANÁLISE DESCRITIVA E QUANTITATIVA DOS DADOS.....	31
3.3	DESENVOLVIMENTO DO ALGORITIMO.....	33
3.3.1	<b>Taxa de crescimento das arborizações.....</b>	<b>37</b>
3.3.2	<b>O Algoritmo.....</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>AFERIÇÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>46</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Vernei e Camargo (2006) cerca de 70% dos desligamentos de energia elétrica são ocasionados por conflitos entre vegetação e rede elétrica. Esse número pode passar de 80% em eventos de ordem natural, como tempestades ou demais alterações climáticas fora do comum, gerando então problemas para os consumidores residenciais, comerciais, industriais e poder público.

A arborização desempenha um papel primordial na urbanização e na melhoria da estética de cidades e parques (Burden, 2008). Além disso, as árvores desempenham um papel essencial como sequestradoras de carbono, pois têm a capacidade de absorver dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e liberar oxigênio (O<sub>2</sub>) (McPherson, 2008), contribuindo assim para a melhoria da qualidade do ar. A presença de áreas arborizadas também tem um impacto positivo no valor de propriedades imobiliárias, estimativas indicam um aumento de 7 a 20% no valor das propriedades localizadas em áreas arborizadas (Most, 2012).

No entanto, é importante destacar que a arborização requer atenção e cuidados adequados. Árvores que não são podadas de forma adequada podem representar um risco para a rede elétrica, pois a madeira e folhas das árvores são condutoras de eletricidade, devido à sua alta concentração de água (Nowak, 1993; Darveniza, 1980). Fatores externos, como tempestades e ventos torrenciais, também devem ser cuidadosamente considerados, uma vez que fortes rajadas de ventos têm o potencial de balançar as árvores e forçar um contato com a rede elétrica, podendo até mesmo causar incêndios. (Zhang *et al.*, 2023).

Existem vários softwares capazes de identificar e coletar dados de arborização uma região específica, estes softwares são conhecidos como sistemas de informações geográficas (GIS) são *softwares* como o *ArcGIS*, o *QGIS*, *OpenTreeMap*, *I-Tree* e até mesmo o *Google Earth*, estes *softwares* são alimentados por uma detecção a laser pulsado por satélite, usualmente conhecida como LiDAR (*Light Detection and Ranging*) (Gazzea *et al.*, 2022; Dubayah; Drake, 2000), todavia uma aferição precisa de crescimento e situação da arborização em tempo real são escassos e custosos. Nesse contexto, a poda preventiva emerge como uma medida crucial e valiosa que merece ser cuidadosamente considerada e estudada.

Conforme dados da CEEE-D (Companhia Estadual de Energia Elétrica – Rio grande do Sul), em 2017 foram realizadas 41.000 podas (BT E MT), gerando um custo total de R\$ 2,5 milhões. Mesmo com o alto investimento, houve cerca de 10.000 ocorrências não programadas na rede, evidenciado, desta forma, a necessidade de atuação mais incisiva para minimização destes números.

Estudos em diferentes regiões apontam também o problema de podas em excesso (o que gera impactos e prejuízos ambientais), como tentativa equivocada de mitigar prejuízos financeiros, como no estudo de Marek (2008), onde, 70% das podas não foram consideradas necessárias.

Desligamento não programados podem causar prejuízos financeiros aos consumidores, principalmente aos industriais, comerciais e poder público, seja, pela produtividade ou venda de produtos/serviços ou ainda por perdas consideráveis de matéria prima e lotes de produção (Security Operations Task Force, 2003). Além disso, interrupções/restabelecimento a plena carga geram efeitos transitórios (surtos elétricos) que danificam equipamentos e dispositivos dos consumidores da própria distribuidora (Velasco, 2003). Problemas gerados aos clientes, além de processos judiciais, trazem uma imagem negativa das distribuidoras para com a sociedade.

Além disso, interrupções no fornecimento geram perdas de faturamento da distribuidora que deixa de faturar energia desde a interrupção até o completo restabelecimento dela, gerando a necessidade de uma mão de obra emergencial sempre a postos (Lacommare; Eto; Lawrence, 2004).

Apesar da importância da arborização nas áreas urbanas, a interação entre árvores e infraestrutura elétrica apresenta desafios significativos, resultando em frequentes interrupções no fornecimento de energia. Este cenário levanta uma questão fundamental que norteia este estudo: Como é possível desenvolver uma metodologia de predição do momento ideal para poda de árvores, em região com potencial conflito com rede elétrica, atuando na melhora da eficiência de gestão de podas?

Desta forma, através de dados de incidentes recebidos dos sistemas legados, e inventário de arborizações, e com apoio do time de biólogos da UniSATC e equipe da CEEE-D, foi possível extrair informações significativas para gerar predições do momento em que determinada área arborizada entrará em tamanho crítico, podendo causar conflito com a rede elétrica da região. Com esses dados extraídos e tratados é possível trabalhar com algoritmos de classificação e predição, como uma regressão linear, de forma a antecipar o momento ideal para poda preventiva.

Para isso, o presente trabalho, propõe-se a desenvolver uma metodologia de predição do momento ideal de poda, para se que possa atuar de forma preditiva, analisando os possíveis pontos e momentos de conflito da arborização com a rede elétrica.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia de predição do momento ideal para poda de árvores, em regiões com potencial conflito com a rede elétrica, atuando na melhora da eficiência de gestão de podas.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, os seguintes objetivos específicos foram elencados:

- Coletar, tratar e normalizar os dados.
- Desenvolver a metodologia.
- Desenvolver algoritmo que baseado em dados históricos possa efetuar predições de futuros momentos e pontos de conflito das árvores com a rede elétrica.
- Desenvolvimento de equação de crescimento para determinada arborização.
- Aferição da acurácia do modelo preditivo gerado.

### 1.1.3 Justificativa

Cerca de 70% dos desligamentos de energia elétrica são gerados por conflitos entre vegetação e rede elétrica (Vernei; Camargo, 2006). Número este que ultrapassa 80% em casualidade climáticas como tempestades e chuvas intensas. Ademais, segundo (Marek, 2008), no objetivo de evitar esse problema, mais de 70% das podas são feitas em excesso e sem necessidade, causando então um impacto ambiental, além disso, podas em excesso e fora do momento ideal podem prejudicar a saúde da vegetação (Jason, 2019). Dessa forma fica evidente a margem de melhoria e a necessidade metodologias para o processo de gestão de poda e predição do momento ideal de poda a fim de minimizar as podas em excesso e diminuir a queda de energia elétrica por conflito entre vegetação e rede elétrica.

## 1.2 ADERÊNCIA DO OBJETO DE PESQUISA AO PPGTIC

O objeto de pesquisa é aderente ao PPGTIC por seguir uma das suas linhas de pesquisa, Tecnologia Computacional, uma vez que foram utilizados algoritmos para gerar a inteligência necessária para predição do momento ideal de poda das regiões arborizadas. Também serão necessárias técnicas de *data science*, para extração, tratamento e normalização dos dados. O projeto também é interdisciplinar por resolver problemas existentes no setor elétrico, visando a economia de milhões de reais para o setor. Também tem forte atuação ambiental e estética, uma vez que evita podas desnecessárias ou demasiadas. Outros trabalhos do PPGTIC já aplicaram interseções disciplinares semelhantes, como (Crotti, 2020) que estudou o impacto de novas tecnologias na qualidade de frutas conservadas em atmosfera controlada, aplicando algoritmos inteligentes para manutenção do crescimento de matéria orgânica e (Nunes, 2021) onde também fora utilizado algoritmos para predição, porém com foco em descobrir o teor de clorofila em arroz irrigados.

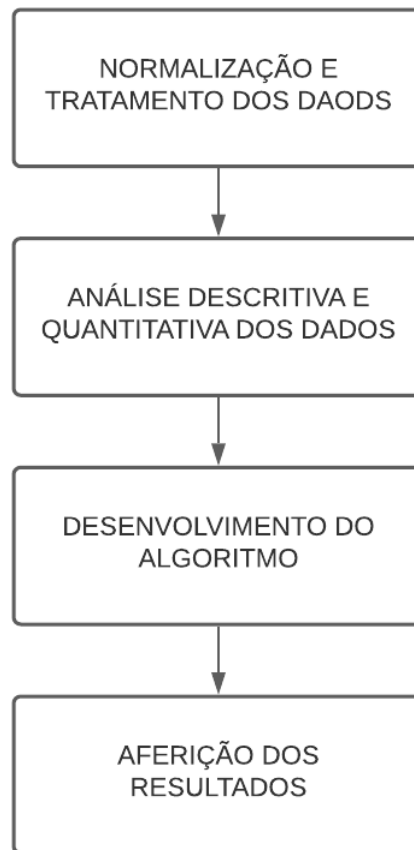
## 1.3 METODOLOGIA

O projeto é interdisciplinar por estar contido na área de engenharia da computação, elétrica e ambiental. No que tange a abordagem, trata-se de quantitativa, buscando medições de variáveis, estatísticas e comparativas. Sua natureza é aplicada, pois busca através dos dados aferidos e tratados, gerar um momento ideal de poda das regiões arborizadas, tal informação por sua vez pode ter aplicabilidade para o time de poda, de modo a otimizar sua gestão de podas.

Na ótica de objetivos, esta pesquisa é quantitativa, visto que tem por finalidade uma análise baseada em dados com uma solução proposta via algoritmos. Os procedimentos são de teor bibliográfico e sua fundamentação teórica experimental. A Figura 1 mostra as etapas seguidas da metodologia desenvolvida.



Figura 1 – Etapas de desenvolvimento da metodologia



Fonte: Do autor (2023)

### 1.3.1 Normalização dos dados

A normalização e tratamento de dados são procedimentos essenciais na preparação de dados para uso em algoritmos. Eles envolvem a padronização de escalas, remoção de *outliers* e preenchimento de lacunas, garantindo a qualidade e consistência dos dados. Nesta etapa foi utilizado a linguagem *Python* no ambiente de desenvolvimento *Colab Research Google*.

### 1.3.2 Análise descritiva e quantitativa dos dados

A análise descritiva e quantitativa de dados é uma etapa crucial no processo de preparação de dados para uso em algoritmos. Ela envolve a exploração minuciosa das características dos dados, oferecendo *insights* valiosos que podem orientar a seleção e o ajuste de algoritmos adequados (Abd El Rahman, 2018). Nesta etapa o objetivo é o entendimento do *dataset*, nesta etapa também é utilizado a linguagem de programação *Python* para fazer os filtros necessários e a plotagem dos dados, no ambiente da *Colab Research Google*.

### 1.3.3 Desenvolvimento do algoritmo

Um algoritmo é um conjunto ordenado de instruções lógicas e precisas que descreve um processo computacional para resolver um problema específico. Ele define um caminho passo a passo para realizar tarefas, manipular dados ou alcançar um objetivo, tornando-se uma base fundamental para o funcionamento de sistemas de computação (Cormen, 2009). O desenvolvimento de algoritmos desempenha um papel essencial na ciência da computação, permitindo a resolução eficiente de problemas complexos em diversas áreas. Esses algoritmos são construídos com base em lógica, matemática e estruturas de dados para processar informações de maneira sistemática e automática. Essa etapa consiste no desenvolvimento do algoritmo que, de fato, realizará predição do momento ideal da poda. Aqui além da linguagem de programação Python, se fez necessário a utilização de bibliotecas de código específicas como a *NumPy* para equações matemáticas e *Shapely.geometry* para manipulação de geolocalizações.

#### 1.3.3.1 Equação de crescimento da arborização

O algoritmo desenvolvido utiliza de equação modelo para descrever o crescimento da arborização para predição do momento ideal de poda. Os modelos de crescimento de árvores são ferramentas essenciais na silvicultura e na ecologia florestal, permitindo a previsão do crescimento futuro das árvores com base em diversos fatores. Alguns modelos como de Nieuwenhuis *et al.* (2016) levam em consideração variáveis como idade da árvore, competição, disponibilidade de recursos, efeitos do clima e características específicas da espécie. Já outros modelos como o de Fan *et al.* (2020) coleta de dados de campo em povoamentos de longleaf pine para calibrar e validar os modelos de crescimento em campanhas de observação com um time em campo. Os resultados destacam a importância de modelos precisos para apoiar a tomada de decisões na gestão florestal, como o momento e a intensidade do desbaste.

Alguns modelos são dinâmicos envolvendo ambas as abordagens, como o estudo de Hellqvist *et al.* (2012) e Liu *et al.* (2015). Também há modelos desenvolvidos com o uso de sistemas de informação geográfica (SIG), como apresentado por Whitehouse *et al.* (2019), que desenvolve um modelo de crescimento dinâmico para povoamentos de *Picea glauca* no

norte da Colúmbia Britânica, Canadá. Dessa forma é possível fornecer uma visão espacialmente explícita do crescimento das árvores em relação à infraestrutura elétrica. Essa abordagem permite uma gestão mais precisa, uma vez que considera não apenas o crescimento das árvores, mas também sua localização geográfica em relação às redes elétricas, porém nessa abordagem o custo elevado pode ser fator limitante para implementação prática.

#### **1.3.4 Aferição dos resultados**

A aferição de resultados de algoritmos é o processo crítico de avaliar a eficácia e o desempenho de algoritmos, geralmente por meio de métricas e testes específicos, sendo comumente utilizado equações matemáticas para tal ou a observação do experimento (Sipser, 2012). Nesta etapa então utilizou-se de duas equações matemáticas comumente aplicadas para aferição de cenários de predição, com o objetivo de determinar a acurácia da predição.

## **2 ESTADO DA ARTE**

Este capítulo é dedicado a estudar os materiais científicos para predição do momento ideal de poda em regiões arbóreas. Logo, é realizada uma revisão sistêmica de literatura, de modo a ambientar-se das tecnologias que veem sendo empregadas na situação problema e em que maturidade se encontram as pesquisas no nível global.

### **2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA**

Revisão sistemática da literatura é um importante mecanismo para tornar possível e acessível uma base de referências solidas e conceituadas acerca do tema buscado, item que é imprescindível para a produção científica, revisar as literaturas acerca do mesmo tema já publicadas.

### **2.2 PROCEDIMENTOS ADOTADOS**

Como fonte de informação, foram utilizadas 3 bases de dados: *IEEE Xplore*, *Web of Science* e *Scopus*. Acessados via portal capes, no endereço eletrônico [www.periodicos.capes.br](http://www.periodicos.capes.br).

Publicado pelo IEEE (Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos) e seus parceiros de publicação, trata-se de uma vasta fonte de dados. Nela encontram-se mais de 195 periódicos, 1.400 processos de conferências, 5.100 padrões técnicos e aproximadamente 2.000 livros (*IEE Xplore*, 2018).

A *Web of Science* é uma base de dados para pesquisa, na qual permite ao usuário acessar uma variedade trabalhos de pesquisa de classe mundial vinculada a um núcleo de periódicos rigorosamente selecionado e descobrir novas informações com exclusividade por meio de conexões de metadados e citações meticulosamente capturadas (*Web of Science*, 2018).

O Scopus combina de maneira única um banco de dados abrangente de resumos e citações com dados enriquecidos e conteúdo acadêmico vinculado (Scopus, 2021).

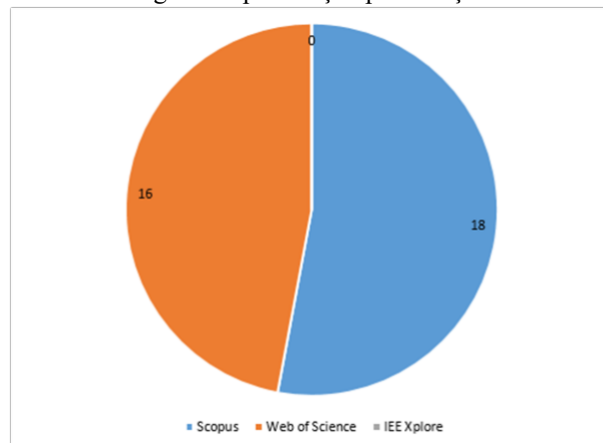
O foco da pesquisa nas bases de dados citadas, é encontrar produções científicas de metodologias para predição do momento ideal de poda de regiões arbóreas através de algoritmos. Dessa forma, as palavras-chave de pesquisa (em língua inglesa, pois são bases internacionais) foram: *maintenance of the distribution network electric* (manutenção de rede elétrica de distribuição), *vegetation* (vegetação), *afforestation* (arborização), *afforestation management* (manejo de arborizações), *algorithm* (algoritmo) e *machine learning* (aprendizado de máquina)

### 2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A primeira busca foi pela palavra *maintenance of the distribution network electric*, foram encontrados um total de 31 resultados nas bases de dados, Scopus (21), *Web of Science* (25) e *IEE Xplore* (9). Em seguida adicionado o operador “and” e um operador “or” entre as palavras *afforestation* e *vegetation*, na busca por trabalhos de manutenção de rede elétrica estudando seus impactos para com as vegetações e arborizações, porém, nenhum resultado foi encontrado.

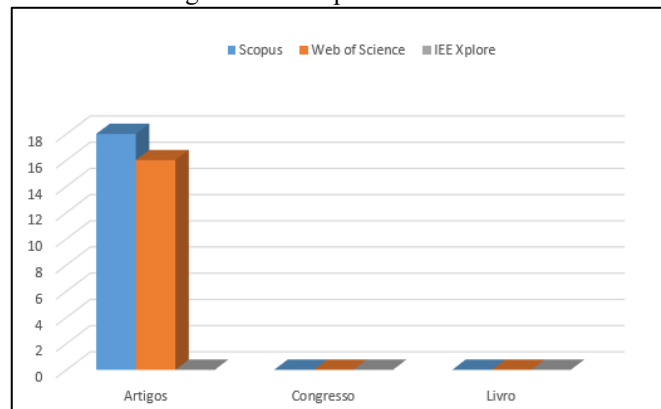
A segunda tentativa foi utilizando o termo *afforestation management*. Neste caso foi obtido 14.547 resultados, Scopus (11.206), *Web of Science* (9.180) e *IEE Xplore* (0). Em seguida foi adicionada a palavra *algorithm* a fim de delimitar os estudos sobre manejo de arborização com utilização de algoritmos, desta forma, 34 resultados foram encontrados, Scopus (16), *Web of Science* (18), *IEE Xplore*: (0). Conforme a Figura 3, é possível verificar que são predominantemente documentações em formato de artigo. E na Figura 4 é possível notar que a concentração das publicações são após 2015.

Figura 2 - publicação por coleção.



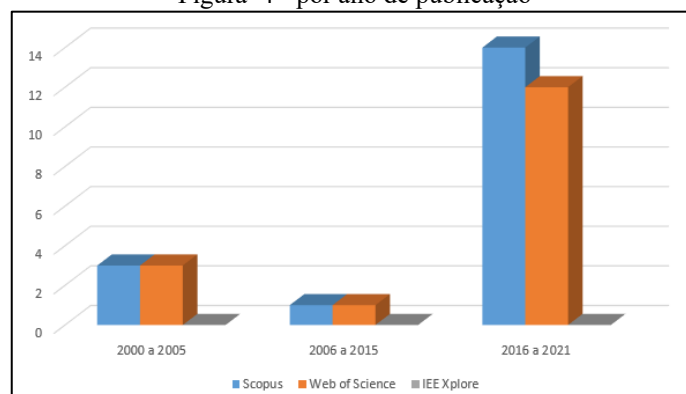
Fonte: Do autor (2023)

Figura 3 - Por tipo de documento



Fonte: Do autor (2023)

Figura 4 - por ano de publicação

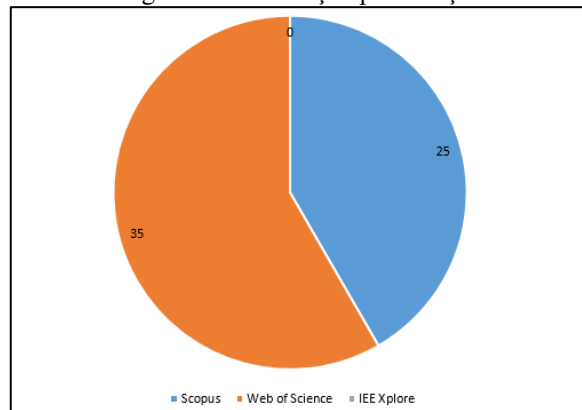


Fonte: Do autor (2023)

A terceira formulação de busca foi combinar *Afforestation management* utilizando o operador “and” com o termo *Machine learning*. Neste caso foram encontrados 60 resultados, Scopus (25), Web of Science (35), IEE Xplore (0). Na Figura 6 é possível visualizar que os

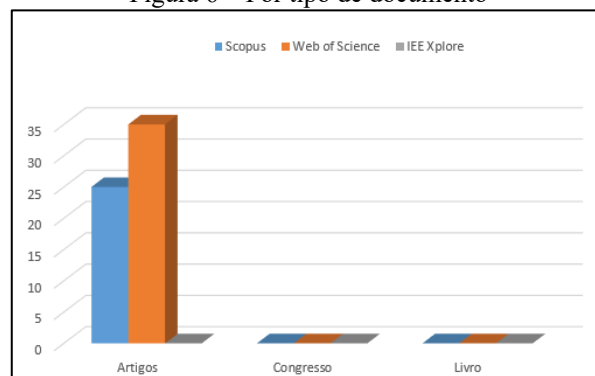
documentos são predominantemente artigos. Na Figura 7 é possível avaliar que a maior parte desses artigos foi publicado após o ano de 2015.

Figura 5 – Publicação por coleção



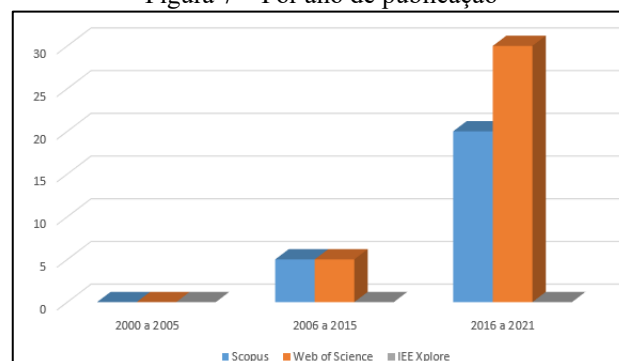
Fonte: Do autor (2023)

Figura 6 – Por tipo de documento



Fonte: Do autor (2023)

Figura 7 – Por ano de publicação



Fonte: Do autor (2023)

Também foram encontrados 3 artigos altamente relevantes, fora das bases pesquisadas anteriormente citadas, por estarem em português. Um deles trata-se de um trabalho de pesquisa

efetuado exclusivamente para a COELCE (Companhia de Energia do Ceará). Outro análogo, efetuado para a CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A). O terceiro foi encontrado no repositório da UNESP (Universidade Federal Paulista).

## 2.4 ANÁLISE DESCRITIVA

Esta seção decorre da análise descritiva dos artigos com maior relevância. Dessa forma, os resumos dos 98 artigos foram lidos. Em seguida, foram identificados 4 que se enquadram com a temática do presente trabalho.

A análise descritiva tem por objetivo informar o estado das artes das pesquisas realizadas e quais tecnologias e algoritmos estão sendo utilizados em situações problema similar a deste trabalho.

O trabalho de Estojonova; Panov *et al.*, (2010) busca uma alternativa economicamente mais viável para mapeamento de vegetações que auxiliem seu manejo e monitoramento. Normalmente essas análises são feitas puramente com informações geradas por imagens capturadas em tecnologia *Light Detection and Ranging (LiDAR)*, porém os sensores *LiDAR* tem limitada cobertura espacial e alto custo. O trabalho então utiliza dados de satélite que tem menor custo e maior abrangência, e cruzam esses dados com os dados do sistema *LiDAR*, utilizando *machine learning* para complementar e gerar um mapeamento fidedigno. Diversas técnicas de *machine learning* são aplicadas a esta tarefa, elas são avaliadas e seu desempenho é comparado por meio estatístico. Métodos de conjunto apresentam maior precisão que regressão ou árvores de decisão. Dessa forma é possível mapear as vegetações e estimar sua altura.

No seu artigo “Desenvolvimento de um sistema de Informação para Regionalização do Controle e Monitoramento de Vegetação sob Redes Elétricas” S. L Carrião *et al* (2004), buscou desenvolver um sistema de informação para regionalização do controle e monitoramento da vegetação sob redes elétricas, considerando as condições biofísicas da região, as condições de desenvolvimento da vegetação e as perspectivas de crescimento/desenvolvimento. Desenvolveu-se um sistema computacional capaz de simular o crescimento em altura das árvores baseado nesses modelos e nas variáveis meteorológicas obtidas nas estações em torno da área estudada, através de regressão linear. O sistema foi implantado na *Intranet* Celesc, o que permite manejo racional da vegetação sob a área de segurança das linhas de energia elétrica (distribuição e transmissão), bem como monitoramento temporal de forma remota. Os dados de georreferenciamento das árvores e da rede foram

obtidos por imagens de satélite. Para a montagem do banco de dados e o cruzamento de informações foi utilizado o *software Arcgis Desktop V.9.0*

O trabalho de “Sistema de gestão e Manejo da Arborização Urbana ao Longo das Redes de Distribuição” C.A Fróes (2007), consiste no desenvolvimento de ferramental para gestão da arborização, apoiando a elaboração de planos anuais de manejo, minimizando a necessidade de podas emergenciais. Resultou no desenvolvimento de um sistema, através da construção de um *data warehouse* com base georreferenciada das árvores ao longo das redes de distribuição. Foram levantados atributos referentes a cada indivíduo arbóreo, traduzindo o estado fitossanitário e determinando o grau de interferência na rede. Os dados de geolocalização e espécie foram coletados através de um time de campo com coletas através físicas, utilizando um dispositivo *personal digital assistant* (PDA), comumente chamado de *hand held*. Após isso, foram cruzados com o mapa georreferenciado da rede elétrica da COELCE. Estas informações deverão ser utilizadas pela Concessionária no seu planejamento de ações preventivas. A operacionalização do projeto deve minimizar as interferências causadas pela arborização urbana sobre as redes elétricas e contribuir com a qualidade da arborização dos municípios da região. As informações, uma vez disponibilizadas pela COELCE – Companhia Energética do Ceará, poderão ser utilizadas pela Prefeitura de Fortaleza ou outros municípios, como ferramenta auxiliar na elaboração do plano diretor de arborização ou para a definição de medidas curativas contra pragas e doenças.

No artigo “Modelo de programação matemática para controle de crescimento da vegetação sob redes de distribuição de energia elétrica”. A. Liliani; R. José (2010), é formulado um modelo matemático de programação binária. Neste modelo busca-se a redução das taxas de interrupção no fornecimento de energia elétrica devido à vegetação e a alocação otimizada de recursos humanos e financeiros, anuais, disponíveis pelas empresas distribuidoras para manutenção da vegetação sob a rede, de modo a não violar as restrições financeiras, os recursos humanos disponíveis pelas empresas e os índices de confiabilidade do sistema. Os índices de confiabilidade devido a interferência da vegetação são obtidos através da técnica de regressão dos dados da série histórica das interrupções de energia elétrica ocorridas devido à vegetação em cada alimentador. Para solução do modelo de otimização proposto utiliza-se um algoritmo genético de Chu-Beasley. A metodologia proposta é validada e testada em um sistema de distribuição aéreo de uma cidade de médio porte.

Dessa forma, analisados os trabalhos apresentados, essa dissertação se propõe a desenvolver uma metodologia para o momento ideal de poda de regiões arbóreas diferente das demais apresentadas nos trabalhos analisados.



### 3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

A metodologia desenvolvida utilizou de dados da região de Porto Alegre/RS fornecidos pela CEEE-D (Companhia Estadual de Distribuição de Energia Elétrica do Rio Grande do Sul) para experimentação e validação e pela UniSATC.

O presente capítulo apresenta os procedimentos para desenvolvimento da metodologia proposta. Devido à natureza da pesquisa que é tecnológica aplicada, também se faz necessário o desenvolvimento de um sistema protótipo, para atingir o objetivo proposta no capítulo 1.

#### 3.1 NORMALIZAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

1.948 árvores foram registradas com dados de altura, espécie, diâmetro do tronco, geolocalização entre outras informações relevantes. Estes registros foram efetuados pelo time de biólogos da UniSATC em parceria com a CEEE-D e disponibilizados para este projeto. A realização dessa aferição iniciou-se em agosto de 2019.

Este conjunto de dados (*dataset*) foi nomeado de arborização urbana e normalizado, tratado e posteriormente utilizado para desenvolvimento da metodologia.

As propriedades contidas nesse *dataset* são descritas conforme a Figura 9. O nome das propriedades do *dataset*, tal como o dicionário de dados foram fornecidos também pelo time da CEEE-D.

Figura 9 – Colunas/propriedades do dataset de arborização urbana

```
Index(['VOLUME', 'PARCELA', 'PAPTOTAL', 'PAP6', 'PAP5', 'PAP4', 'PAP3', 'PAP2',
      'PAP1', 'ORIGEM', 'OBS', 'NOMEPOPULA', 'LONGITUDE', 'INDIVIDUO',
      'GRUPOECOLO', 'GI', 'FORMADEVID', 'FITOSSANID', 'FAMILIA', 'ESPECIE',
      'DISTANCIAR', 'DISPERSAO', 'DAPM', 'DAPCM', 'COD', 'CALCADA', 'AUTOR',
      'ALTURA', 'MD5', 'LATITUDE', 'ATIVO', 'ULTIMASINC', 'MD5PROJETO',
      'MD5ESPECIE', 'INCLINACAO', 'geometry'],
      dtype='object')
```

Fonte: Do autor (2023)

Duas colunas foram removidas por possuírem +20% dos seus dados como nulos, sendo elas referente ao grupo ecológico e dispersão dos galhos. Conforme a Figura 10.

Figura 10 – Remoção de colunas com mais de 20% de dados nulos

```
# Verificando os dados nulos
# Obs: Colunas com +20% de dados nulos serão deletadas, menos que isso pode ser feito algum tratamento
mappingTrees.isnull().sum() * 100 / len(mappingTrees)
```

VOLUME	0.000000
PARCELA	0.000000
PAPTOTAL	0.000000
PAP6	0.000000
PAP5	0.000000
PAP4	0.000000
PAP3	0.000000
PAP2	0.000000
PAP1	0.000000
ORIGEM	2.469758
NOMEPOPULA	1.159274
INDIVIDUO	0.000000
GRUPOECOLO	22.782258
GI	0.000000
FORMADEVID	2.469758
FITOSSANID	0.000000
FAMILIA	2.469758
ESPECIE	2.469758
DISPERSAO	20.715726
DAPM	0.000000
DAPCM	0.000000
COD	0.000000
ALTURA	0.000000
ATIVO	0.000000
ULTIMASINC	0.000000

dtype: float64

Fonte: Do autor (2023)

Também fora tratado e normalizado o *dataset* com registro das ocorrências de interrupção de fornecimento de energia devido a problemas na rede elétrica. Essas ocorrências foram registradas de 2017 a 2020, pelo próprio time interno da CEEE-D. Conforme a Figura 11, ao todo foram 492.692 ocorrências registradas.

Figura 11 – Ocorrência registradas pela CEEE-D

```
#Importação das ocorrências de 2017 a 2020
ocorrencias_2017_2020 = pd.read_csv('/content/Ocorrencias/Ocorrencias_2017_2020_07_30.csv', sep=' ', low_memory=False)
ocorrencias_2017_2020
```

	ANO_OCORRENCIA	NUM_OCORRENCIA	ANO_OCORR_VINC	NUM_OCORR_VINC	TIPO_OCORR	CONDICOES_TEMPO	NIVEL_TENSAO	ABRANGENCIA	DEFEITO_FALHA	X_DEFEITO_FALHA	Y_DEFEITO_FALHA
0	2017	38693	2016.0	584797.0	N	B	1.0	O	63862654	0	0
1	2017	57173	2017.0	57586.0	N	O	NaN	O	33051518	388242.173	6440358.352
2	2017	57175	2017.0	57586.0	N	O	NaN	O	27807941	389748.743	6447764.836
3	2017	57188	2017.0	57586.0	N	O	NaN	O	56358555	389085.938	6438579.467
4	2017	57157	2017.0	57586.0	N	C	NaN	O	13587790	389520.773	6447683.01
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
492687	2017	23387	NaN	NaN	N	N	2.0	C	046709006	556768.099	6658835.213
492688	2017	27540	2017.0	15961.0	N	O	NaN	I	188000420B	408315.221	6528488.485
492689	2017	321642	NaN	NaN	N	B	1.0	I	188000420B	408315.221	6528488.485
492690	2017	437393	NaN	NaN	N	B	1.0	I	173008691	305685.244	6318347.229
492691	2017	594193	2017.0	594190.0	N	O	NaN	I	173008691	305685.244	6318347.229

492692 rows x 50 columns

Fonte: Do autor (2023)

Porém, nem todas essas ocorrências foram de conflito da vegetação com rede elétrica. Ao todo, existem 98 tipos tabelados pela CEEE-D para classificar um problema na rede elétrica. Sendo o objeto de estudo deste artigo, as causas classificadas como 304 e 312, sendo respectivamente árvore ou vegetação e queda de árvore, como causa da interrupção na rede elétrica e concomitantemente uma ocorrência.

Figura 12 – Dicionário de dados das ocorrências fornecido pela CEEE-D

CAUSA:

CODIGO PAI	CAUSA	DESCRICAO	INTERRUPCAO
1	101	101 - ALTERACAO P/ MELHORIA	S
1	102	102 - ALTERACAO P/ AMPLIACAO	S
1	201	201 - MANUTENCAO PREVENTIVA	S
1	202	202 - MANUTENCAO CORRETIVA	S
3	301	301 - POLUICAO	S
3	303	303 - DESCARGA ATMOSFERICA	S
3	304	304 - ARVORE OU VEGETACAO	S
3	305	305 - ANIMAIS	S
3	306	306 - EROSAO	S
3	307	307 - QUEIMA OU INCENDIO	S
3	308	308 - INUNDACAO	S
3	310	310 - CORROSAO	S
3	311	311 - VENTO	S
3	312	312 - QUEDA DE ARVORE	S
4	402	402 - VANDALISMO	S
4	404	404 - EMPRESA DE SERV. PUBLICOS OU CONTRATADAS	S
4	407	407 - LIGACAO CLANDESTINA	S
4	408	408 - OBJETO NA REDE	S
4	409	409 - ROUBO	S
4	410	410 - ABALROAMENTO	S
4	411	411 - ACIDENTE DE TERCEIROS	N
4	412	412 - DEFEITO CLIENTE AFETANDO OUTROS	S
4	413	413 - DEFEITO INTERNO NAO AFETANDO OUTRAS UCS	S
4	414	414 - INTERFERENCIA DE TERCEIROS	S
4	490	490 - FALTA DE SEGURANCA PUBLICA	S
7	701	701 - ERRO OPERACAO	S

Fonte: CEEE-D

Logo, mostrou-se necessário fazer uma filtragem pelas ocorrências apenas com causa classificada de identificador 304 e 312. Isso gerou um total de 14.914 ocorrências, o que dá um número médio, superior a 10 ocorrências por dia.

Na sequência, removeu-se as ocorrências cuja coluna X\_DEFEITO\_FALHA e Y\_DEFEITO\_FALHA estavam sem valor, pois estes campos representam a geolocalização da ocorrência.

Figura 13 – Remoção das ocorrências sem geolocalização

```

ocorrencias_2017_2020 = ocorrencias_2017_2020.loc[ocorrencias_2017_2020['X_DEFEITO_FALHA'] != '0']
ocorrencias_2017_2020 = ocorrencias_2017_2020.loc[ocorrencias_2017_2020['Y_DEFEITO_FALHA'] != '0']
ocorrencias_2017_2020

```

ANO_OCORRENCIA	NÚM_OCORRENCIA	ANO_OCORR_VINC	NÚM_OCORR_VINC	TIPO_OCORR	CONDICOES_TEMPO	NIVEL_TENSAO	ABRANGENCIA	DEFEITO_FALHA	X_DEFEITO_FALHA	Y_DEFEITO_FALHA	LOCALIDADE	LOCALIZACAO	CAUSA	INTERRUPCAO	ALIM_PRIMARI
150	2017	49742	NaN	NaN	N	B	1.0	I	125040128	494624.411	6558029.742	1250	R 304.0	S	MOS 3
279	2017	25724	NaN	NaN	N	C	1.0	O	35872900	491053.803	6681615.697	1490	U 304.0	N	PAL1616S
280	2017	25603	NaN	NaN	N	C	2.0	C	00095	463119.746	6668785.551	0930	R 304.0	S	GUA 11
302	2017	33015	NaN	NaN	N	B	1.0	P	149005284	478326.14	6676007.608	1490	U 304.0	S	PAL0445Z
314	2017	11729	NaN	NaN	N	T	1.0	I	149004302	477082.117	6670287.596	1490	U 304.0	S	PAL1313E
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
492571	2017	516873	NaN	NaN	N	B	2.0	C	03866	459805.592	6650171.048	0190	R 304.0	S	GUA 12
492607	2017	471735	NaN	NaN	N	B	1.0	I	065001552	388115.855	6613181.897	0650	R 304.0	S	DFE 04
492667	2017	299635	NaN	NaN	N	B	2.0	A	VIA 227	491930.989	6676165.323	2300	U 304.0	S	VIA 227
492671	2017	126503	NaN	NaN	N	T	2.0	C	00850	498500.474	6671350.636	2300	U 304.0	S	VIA 11E
492680	2017	31499	NaN	NaN	N	B	2.0	C	00491	347122.665	6538353.909	0450	R 304.0	S	CGU 5

14822 rows x 50 columns

Fonte: Do autor (2023)

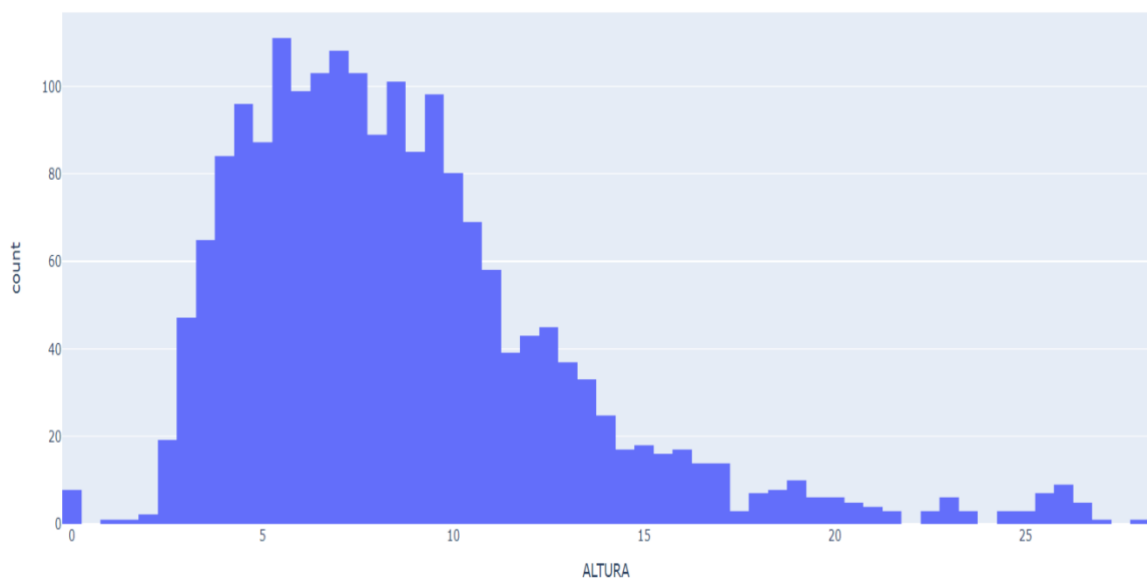
Dessa forma, restaram 14.822 ocorrências concomitantes com o trabalho.

### 3.2 ANÁLISE DESCRITIVA E QUANTITATIVA DOS DADOS

Analisando o *dataset* de arborização urbana registrado, é possível observar que a maior concentração de árvores está na altura de 5 a 10 metros, altura esta que já apresenta risco para redes de distribuição de energia primária e secundária, pois, normalmente são de 9 ou 7 metros respectivamente, segundo dados fornecidos pela CEEE-D.

A distribuição de alturas pode ser conferida na Figura 14.

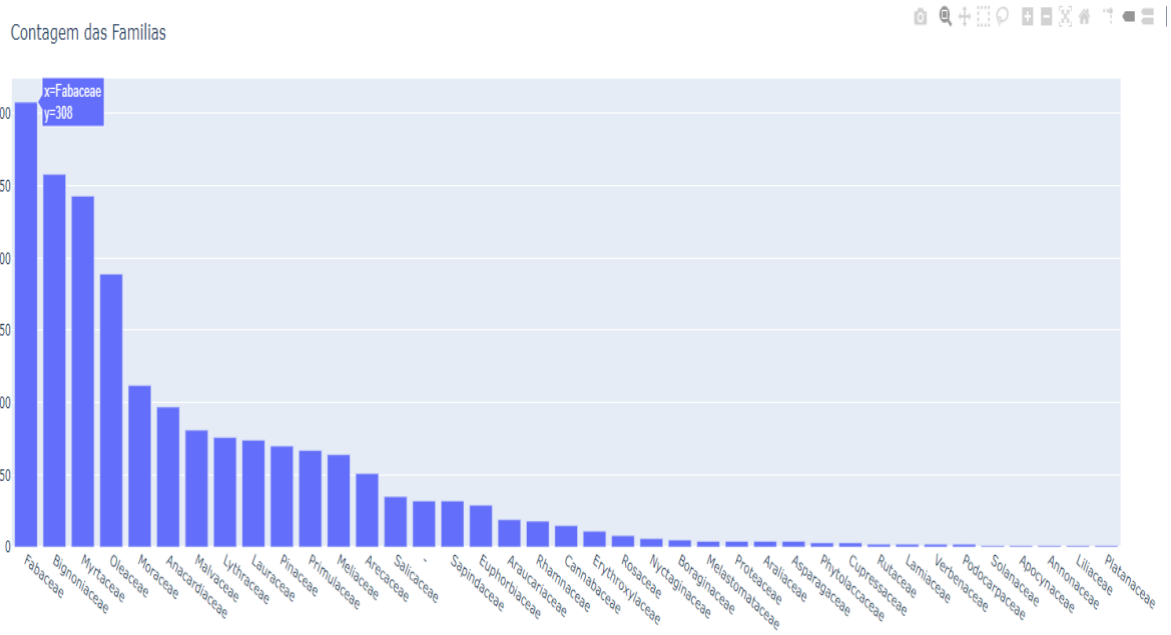
Figura 14 – Quantidade x Altura das árvores observadas



Fonte: Do autor (2023)



Figura 16 – Contagem e agrupamentos das árvores por família



Fonte: Do autor (2023)

Das 1948 árvores observadas, aproximadamente 61% são de origem exótica, 36% são de origem nativa, e o restante não foi declarado.

Figura 17 – Contagem e agrupamento das árvores por origem



Fonte: Do autor (2023)

### 3.3 DESENVOLVIMENTO DO ALGORITMO

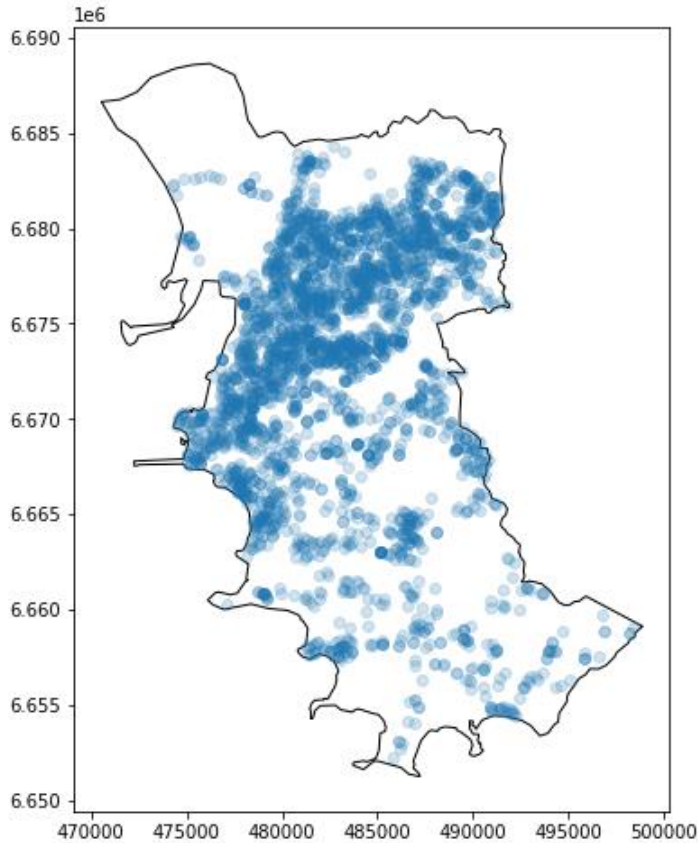
Inicialmente imaginava-se desenvolver o algoritmo baseado nas ocorrências de conflito da vegetação com a rede elétrica. Porém ao cruzar os dados de ocorrência fornecidos pela CEEE-D com a rede elétrica, notou-se uma discrepância muito grande entre o ponto de conflito para com a vegetação mais próxima.

Para chegar nessa conclusão, o primeiro caminho foi plotar graficamente as ocorrências de conflito de rede elétrica e vegetação de 2017 a 2020, fornecidos pela CEEE-D, conforme a Figura 18.

Figura 18 – Pontos azuis representando as ocorrências no mapa da região.

```
base = porto_alegre.plot(color='white', edgecolor='black', figsize=(15,8))
ocorrencias_dados.plot(ax=base,figsize=(15,8), alpha=0.2)
```

<matplotlib.axes.\_subplots.AxesSubplot at 0x7f0b10c1fb10>



Fonte: Do Autor

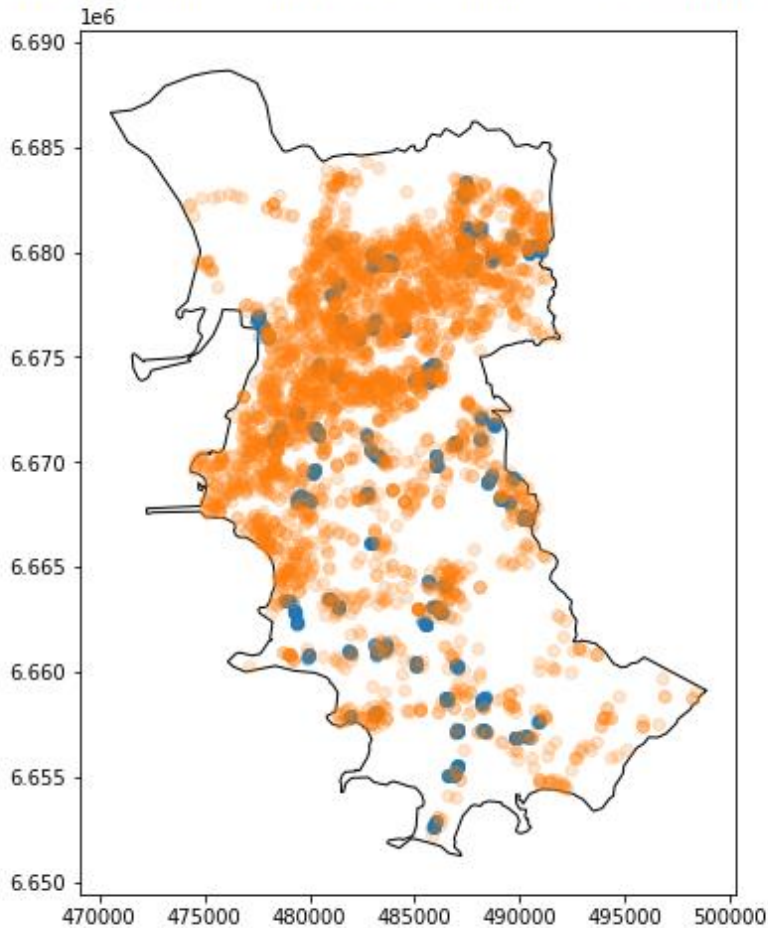
Em seguida, foi projetado as arborizações urbanas da amostra, graficamente, sendo as ocorrências os pontos laranjas e as arborizações os pontos azuis.

Figura 19 – Ocorrências x arborizações urbanas registradas na região

```
base = porto_alegre.plot(color='white', edgecolor='black', figsize=(15,8))
arborizacao_urbana.plot(ax=base,figsize=(100,100), alpha=0.2)
ocorrencias_dados.plot(ax=base,figsize=(15,8), alpha=0.2)
```



<matplotlib.axes.\_subplots.AxesSubplot at 0x7f0b10993550>



Fonte: Do autor (2023)

Graficamente ainda não era possível ter certeza do problema anteriormente citado, mas já era possível notar uma discrepância. Ao cruzar a distância das ocorrências com a vegetação mais próxima registrada, foi possível concluir que as distâncias eram muito grandes, conforme a Figura 20. Sendo a primeira coluna o identificador e o segundo a distância de fato entre a ocorrência e a arborização mais próxima.



Figura 20 – Ocorrência x Arborização mais próxima

```
distances = ocorrencias_dados.distance(arborizacao_urbana.iloc[0].geometry)
```

```
▶ distances
```

279	8274.328145
302	5864.380998
314	10953.354152
852	5948.284791
1041	6682.777477
	...
491477	11012.724052
491518	13124.446904
491945	18936.912881
491965	11433.122952
492305	14461.582615

```
Length: 3332, dtype: float64
```

```
[ ] # A ocorrência mais próxima foi a 176 metros, da arborização em questão.
distances.min()

176.3957964401574
```

Fonte: Do autor (2023)

A menor distância de ocorrência para uma arborização registrada, foi de 176.95 metros. Neste momento levantou-se a hipótese de as ocorrências registradas não serem exatamente no ponto de conflito entre rede elétrica e vegetação, mas sim em outro ponto. Hipótese essa que fora confirmada posteriormente com o time de poda da CEEE-D. Os pontos de geolocalização fornecidos, na verdade eram das comumente chamadas chaves seccionadoras da rede elétrica, que são dispositivos de manobra na rede de distribuição e que tem por função barrar um efeito cascata de queda em toda a rede elétrica. Um dispositivo protetivo que isola segmentos da rede elétrica.

Por este motivo, a ideia inicial de desenvolver um algoritmo baseado nas ocorrências para predição do momento ideal das podas, precisou ser adaptado, uma vez que seria necessário que as ocorrências de fato tivessem registrado qual vegetação e em qual ponto essa vegetação atingiu a rede.

O segundo caminho possível, e escolhido para o andamento do projeto, foi trabalhar com o *dataset* das arborizações urbanas registradas.

O primeiro passo foi desenvolver uma equação de crescimento para cada espécie e descobrir sua taxa de crescimento. Em seguida, por saber o tamanho atual da árvore e sua taxa

de crescimento, determinar em quantos meses ela teria crescido suficiente para ter contato com a rede elétrica mais próxima.

Sabendo que existem dois tipos de rede, as primárias e secundárias, precisou-se também identificar qual vegetação estava mais próxima de qual tipo de rede, em seguida, definiu-se um limite de altura para cada árvore, com base na rede à qual ela se encontra mais próxima na horizontal. Essa delimitação se faz crucial para prevenir possíveis conflitos no caso de crescimento vertical das árvores, evitando que interajam de forma indesejada com a rede.

### 3.3.1 Taxa de crescimento das arborizações

Segundo S. L Carrião *et al* (2004), um interessante ponto de partida para descrever a taxa de crescimento de uma árvore é sua espécie, por compilar diversas características. Baseado nessa literatura, 12 campanhas para 20 árvores foram realizadas para medir seus respectivos crescimentos. Com esse crescimento, foi possível determinar uma taxa de crescimento e consequente uma equação para descrever seu comportamento. Desta forma, foi possível gerar uma equação capaz de exemplificar o processo de desenvolvimento da equação para representar o crescimento de uma árvore popularmente conhecida como Jacarandá.

Figura 21 – Observação do crescimento ao longo de 12 campanhas

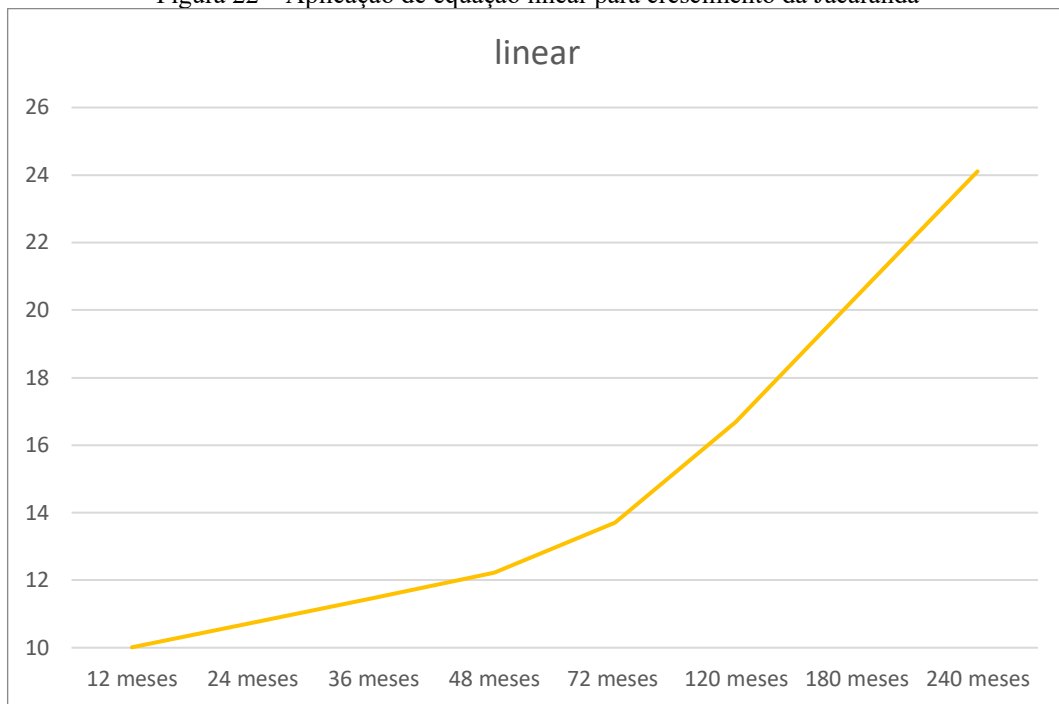
Árvore	1	Árvore	2	Árvore	3	Árvore	4	Árvore	5	Árvore	6	Árvore	7
Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura
1	12	1	5	1	7	1	9	1	4	1	6	1	7,4
2	12,1	2	5,2	2	7	2	9,3	2	4,1	2	6,2	2	7,5
3	12,2	3	5,4	3	7	3	9,5	3	4,5	3	6,4	3	7,6
4	12,2	4	5,5	4	7	4	9,6	4	4,4	4	6,4	4	7,6
5	12,2	5	5,5	5	7	5	9,62	5	4,3	5	6,3	5	7,75
6	12,2	6	5,5	6	7	6	9,65	6	4,5	6	6,35	6	7,8
7	12,2	7	5,5	7	7	7	9,65	7	4,6	7	6,45	7	7,8
8	12,2	8	5,6	8	7	8	9,66	8	4,7	8	6,35	8	7,8
9	12,3	9	5,7	9	7	9	9,7	9	5	9	6,45	9	8
10	12,3	10	5,8	10	7	10	10,2	10	5,2	10	6,55	10	8,2
11	12,4	11	5,9	11	7	11	10,7	11	5,3	11	6,76	11	8,3
12	12,5	12	6	12	7	12	11	12	5,8	12	6,8	12	8,5
Árvore	8	Árvore	9	Árvore	10	Árvore	11	Árvore	12	Árvore	13	Árvore	14
Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura
1	8	1	9,5	1	11	1	10,5	1	11	1	12	1	11,5
2	8,5	2	9,6	2	12	2	10,6	2	11,1	2	12,4	2	11,5
3	9	3	9,7	3	12	3	10,6	3	11,15	3	12,6	3	11,5
4	9	4	9,7	4	11,8	4	10,6	4	11,15	4	12,6	4	11,5
5	9	5	9,7	5	11,8	5	10,6	5	11,2	5	12,6	5	11,5
6	9	6	9,7	6	11,8	6	10,6	6	11,2	6	12,6	6	11,5
7	9	7	9,7	7	12,5	7	10,6	7	11,2	7	12,6	7	11,5
8	9	8	9,7	8	12,6	8	10,6	8	11,2	8	12,6	8	11,5
9	9	9	9,7	9	12,5	9	10,6	9	11,2	9	12,7	9	11,5
10	9	10	9,7	10	12,7	10	10,8	10	11,2	10	12,8	10	11,6
11	9,5	11	9,8	11	12,9	11	10,9	11	11,3	11	12,9	11	11,6
12	10	12	10	12	13	12	8	12	11,35	12	13	12	11,7
Árvore	15	Árvore	16	Árvore	17	Árvore	18	Árvore	19	Árvore	20	Árvore	média
Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura	Campanha	Altura
1	11,6	1	13	1	7	1	16	1	6	1	6 jan	1	9,175
2	11,8	2	13,1	2	7,3	2	16	2	6,5	2	6,3 fev	2	9,405
3	11,8	3	13,1	3	7,45	3	16,1	3	6,9	3	6,8 mar	3	9,565
4	11,8	4	13,2	4	7,45	4	16,1	4	7	4	7 abr	4	9,58
5	11,8	5	13,2	5	7,45	5	16,1	5	7,1	5	7,1 mai	5	9,591
6	11,8	6	13,2	6	7,45	6	16,1	6	7,1	6	7,1 jun	6	9,6075
7	11,8	7	13,2	7	7,5	7	16,1	7	7,1	7	7,1 jul	7	9,655
8	11,8	8	13,25	8	7,6	8	16,1	8	7,15	8	7,15 ago	8	9,678
9	11,8	9	13,4	9	7,6	9	16,1	9	7,2	9	7,2 set	9	9,7325
10	11,8	10	13,4	10	7,7	10	16,1	10	7,7	10	7,2 out	10	9,8475
11	11,8	11	13,5	11	7,8	11	16,15	11	8,5	11	7,2 nov	11	10,0105
12	11,8	12	13,5	12	7,9	12	16,2	12	9	12	7,2 dez	12	10,0125

Fonte: Do autor (2023)

Com os valores de crescimento das 20 árvores observadas, foi possível testar equações que melhor descrevessem seu crescimento.

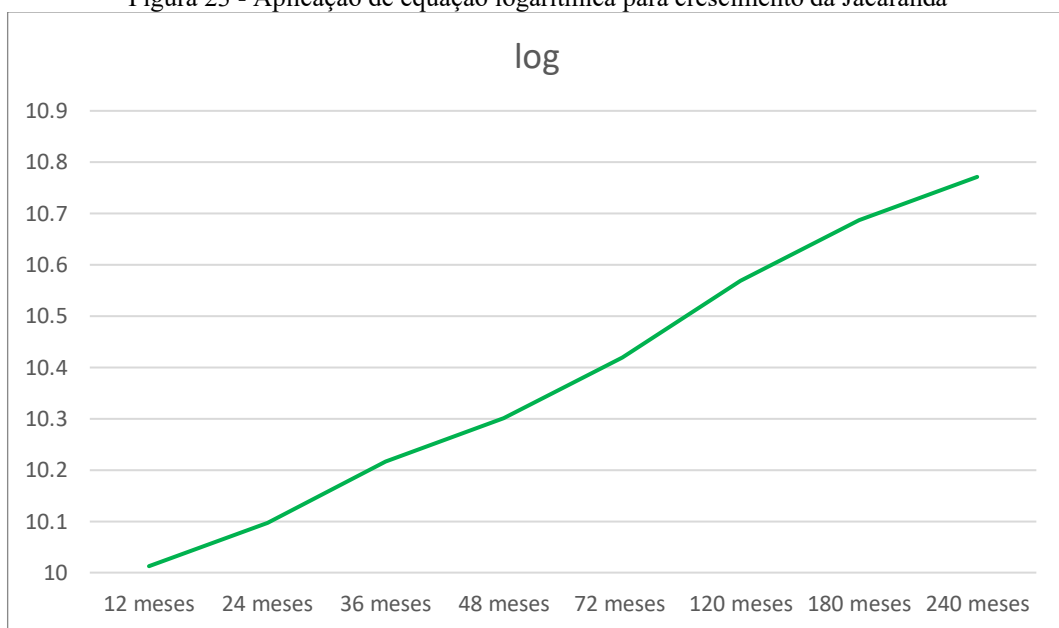
Foram testadas equações lineares, polinomiais e logarítmicas. Sendo as polinomiais de segunda ordem as que melhor descreveram o crescimento das árvores jacarandá.

Figura 22 – Aplicação de equação linear para crescimento da Jacarandá



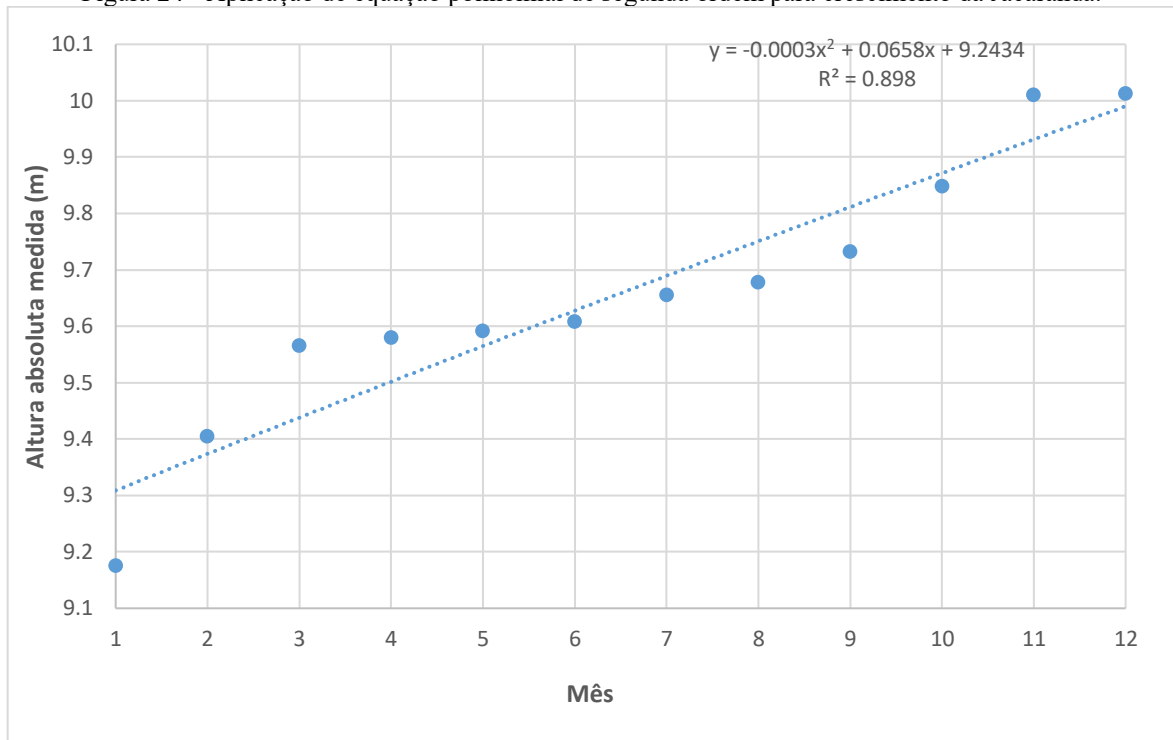
Fonte: Do autor (2023)

Figura 23 - Aplicação de equação logarítmica para crescimento da Jacarandá



Fonte: Do autor (2023)

Figura 24 - Aplicação de equação polinomial de segunda ordem para crescimento da Jacarandá.



Fonte: Do autor (2023)

O mesmo procedimento de selecionar árvores para serem monitoradas, medir seu crescimento e gerar uma equação para seu comportamento, foi efetuado com todas as espécies do *dataset* de arborizações urbanas. Para fins de validação da metodologia, utilizou-se a equação com taxa de crescimento da Jacarandá.

Figura 25 – Ilustrando o crescimento de uma vegetação



Fonte: Do autor (2023)

### 3.3.2 O Algoritmo

Com a taxa de crescimento obtida, o próximo passo é aplicar nas árvores de sua respectiva espécie a equação para obter seu crescimento, até que esta adquira uma altura limite para sua localização, considerando a proximidade de uma rede elétrica que estivesse próxima o suficiente na horizontal, para ser afetada pelo crescimento da árvore na vertical. Na Figura 26 é possível visualizar que apesar de algumas árvores não estarem exatamente embaixo de uma rede elétrica, em determinado ponto de seu crescimento, pode atingir a rede elétrica próxima.

Figura 16 – Redes elétricas em conflito com arborizações

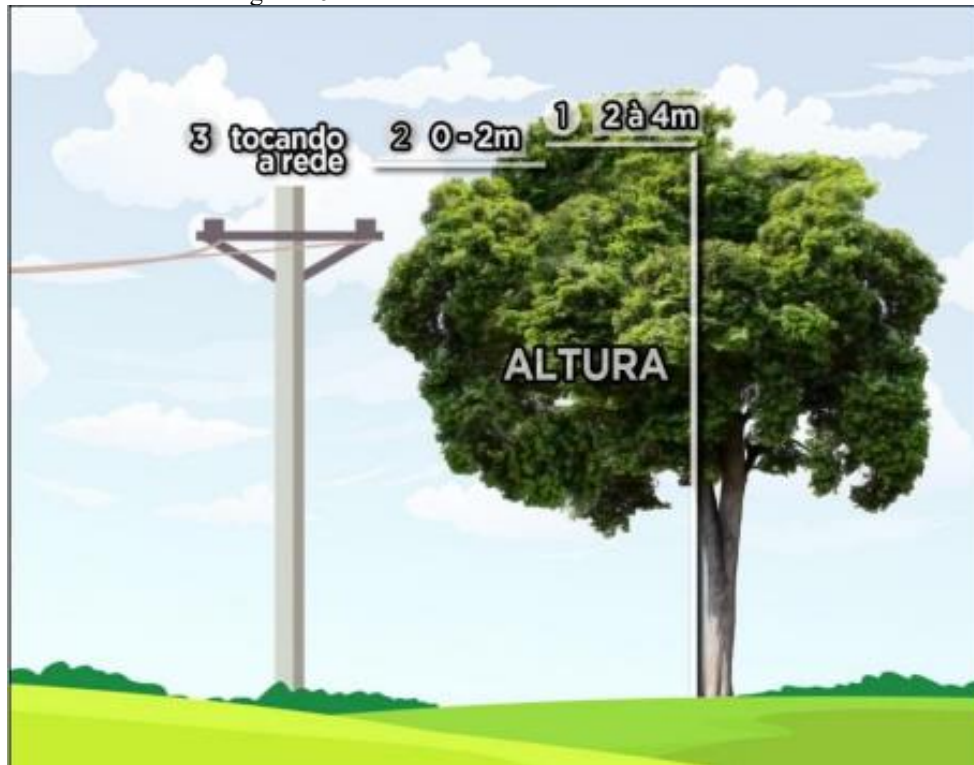


Fonte: Do autor



Uma tabela de referência foi fornecida pela CEEE-D, para caracterizar os níveis de proximidade horizontal de uma árvore com a rede elétrica, são 3 classes (3 – tocando a rede, 2 – entre 0 e 2 metros, 1 - entre 2 a 4 metros de distância da rede). Logo, conclui-se que uma árvore que está a mais de 4 metros de distância da rede elétrica horizontalmente, não entra na aferição, por possuir baixo risco de conflito, mesmo que sua altura exceda a rede elétrica.

Figura 26 – Altura e distância da rede suas classes



Fonte: Do autor (2023)

Na sequência, filtrou-se pelas arborizações de Jacarandá, e definiu-se quais estavam próximas de redes elétricas, com menos de 4 metros de distância, ou seja, que com seu crescimento total, estão na classe que pode oferecer perigo para a rede elétrica.

Figura 27 – Definição das árvores de Jacarandá com potencial conflito com a rede elétrica baseado em sua distância para com a rede

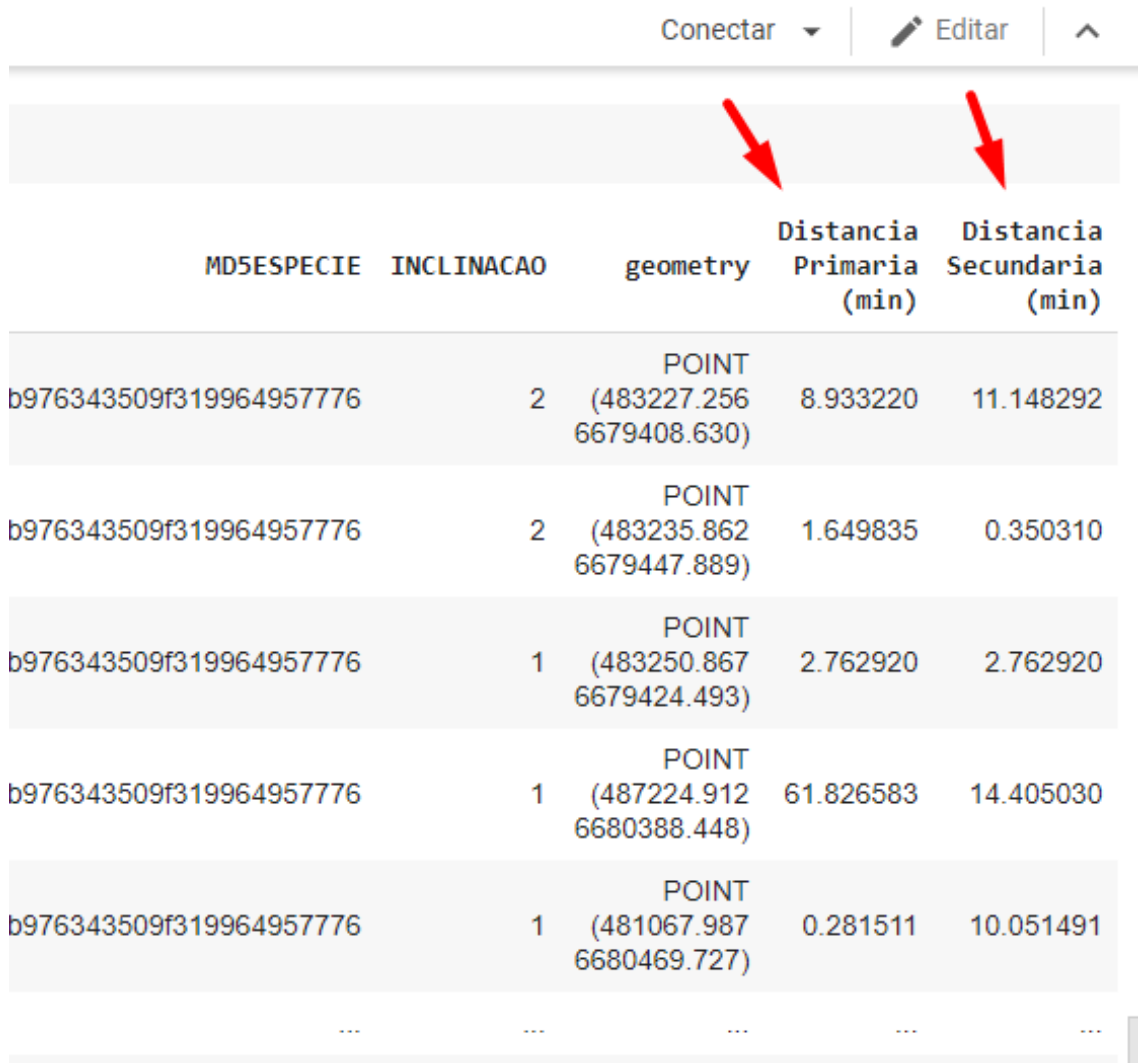
```
[ ] min_dist_primary = np.empty(mappingTreesJacaranda.shape[0])
    for i, point in enumerate(mappingTreesJacaranda.geometry):
        min_dist_primary[i] = np.min([point.distance(line) for line in linesPrimary])

[ ] min_dist_secondary = np.empty(mappingTreesJacaranda.shape[0])
    for i, point in enumerate(mappingTreesJacaranda.geometry):
        min_dist_secondary[i] = np.min([point.distance(line) for line in linesSecondary])
```

Fonte: Do Autor (2023)

Em seguida adicionou-se duas novas colunas ao *dataset* de arborização urbana, para representar quais suas respectivas distâncias de cada tipo rede (primário e secundária), e consequente, orientar em quais devem ter o crescimento monitorado, conforme ilustrado na Figura 28.

Figura 28 – Novos campos no dataset de arborização urbana



The screenshot shows a data table with the following columns: MD5ESPECIE, INCLINACAO, geometry, Distancia Primaria (min), and Distancia Secundaria (min). Two red arrows point to the last two columns. The table contains five rows of data, each with a unique MD5 hash, an inclination value, a geometry point, and two distance values.

MD5ESPECIE	INCLINACAO	geometry	Distancia Primaria (min)	Distancia Secundaria (min)
b976343509f319964957776	2	POINT (483227.256 6679408.630)	8.933220	11.148292
b976343509f319964957776	2	POINT (483235.862 6679447.889)	1.649835	0.350310
b976343509f319964957776	1	POINT (483250.867 6679424.493)	2.762920	2.762920
b976343509f319964957776	1	POINT (487224.912 6680388.448)	61.826583	14.405030
b976343509f319964957776	1	POINT (481067.987 6680469.727)	0.281511	10.051491

Fonte: Do Autor (2023)

Na sequência definiu-se uma altura limite para as árvores Jacarandá próximas a redes primárias e secundárias. Sendo a rede primária, a mais alta, cuja altura é de 9 metros. Já a secundária é padronizada em 7 metros. Logo definiu-se valores de segurança para ativar uma poda em uma árvore que esteja no alcance horizontal inferior a 4 metros de uma rede primária ou secundária, as alturas limites escolhidas foram 7.8 e 6.2, para rede elétrica primária e secundária respectivamente.

Figura 27 – definição dos limites de altura para ativar um evento de poda

```
[ ] /usr/local/lib/python3.7/dist-packages/geopandas/geodataframe.py:1322: SettingWithCopyWarning:
A value is trying to be set on a copy of a slice from a DataFrame.
Try using .loc[row_indexer,col_indexer] = value instead

See the caveats in the documentation: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user\_guide/indexing.html#returning-a-view-versus-a-copy
super(GeoDataFrame, self).__setitem__(key, value)

[ ] mappingTreesJacaranda['Distância (min) secundária'] = minDistSecondary

/usr/local/lib/python3.7/dist-packages/geopandas/geodataframe.py:1322: SettingWithCopyWarning:
A value is trying to be set on a copy of a slice from a DataFrame.
Try using .loc[row_indexer,col_indexer] = value instead

See the caveats in the documentation: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user\_guide/indexing.html#returning-a-view-versus-a-copy
super(GeoDataFrame, self).__setitem__(key, value)

▶ mappingTreesJacaranda['LIMITE_ALTURA'] = 7.8 ←

/usr/local/lib/python3.7/dist-packages/geopandas/geodataframe.py:1322: SettingWithCopyWarning:
A value is trying to be set on a copy of a slice from a DataFrame.
Try using .loc[row_indexer,col_indexer] = value instead

See the caveats in the documentation: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user\_guide/indexing.html#returning-a-view-versus-a-copy
super(GeoDataFrame, self).__setitem__(key, value)

[ ] mappingTreesJacaranda.loc[mappingTreesJacaranda['Distância (min) primária'] > mappingTreesJacaranda['Distância (min) secundária'],'LIMITE_ALTURA'] = 6.2 ←

/usr/local/lib/python3.7/dist-packages/pandas/core/indexing.py:1763: SettingWithCopyWarning:
A value is trying to be set on a copy of a slice from a DataFrame.
Try using .loc[row_indexer,col_indexer] = value instead

See the caveats in the documentation: https://pandas.pydata.org/pandas-docs/stable/user\_guide/indexing.html#returning-a-view-versus-a-copy
i.setter(loc, value)

mappingTreesJacaranda.head()
```

Fonte: Do autor (2023)

Na Figura 28 podemos ver alguns exemplos. A altura atual e a altura limite de uma árvore, relembrando que a altura limite é baseado no tipo de rede elétrica mais próxima da árvore.

Figura 28 – Amostragem de árvores com altura atual x altura limite

	DATA	ID	ALTIURA_AT	ALTURA_LIMITE
0	2020-11-07 09:51:39	2	4.3300	6.2
1	2021-08-30 17:16:32	26	5.9355	7.8
2	2020-12-06 18:56:39	151	5.8900	7.8
3	2021-08-03 18:56:39	491	5.9355	7.8
4	2021-07-04 18:56:39	546	4.2725	6.2
5	2021-08-03 18:56:39	784	5.9355	7.8
6	2021-08-03 18:56:39	894	5.8355	7.8
7	2021-02-15 20:13:54	1044	5.8050	7.8
8	2021-02-15 20:13:54	1063	5.8050	7.8
9	2020-12-17 20:13:34	1500	5.9300	7.8
10	2021-01-16 20:13:34	1514	5.8900	7.8
11	2021-01-16 20:13:34	1567	5.8900	7.8

Fonte: Do autor (2023)



Em seguida, aplicou-se a taxa de crescimento ao longo tempo para Jacarandá, até que as árvores chegassem no limite permitido. Após isso, progrediu-se um evento de poda.

Figura 29 – Aplicando a taxa de crescimento e ativando um evento de poda quando o limite é atingido.

```
def GenerateSyntheticData(dataframe):
    listSyntheticData = list()
    event = True
    listEvent = list()
    # Percorre todas as árvores
    for index, row in dataframe.iterrows():

        listSyntheticData.append(row)

        # Simula 12 meses de crescimento para cada árvore
        rowPrev = row['ALTURA']

        for month in range(12):

            rowSynthetic = row.copy()

            rowSynthetic['ALTURA'] = rowPrev + (listGrowthRate[month])
            rowSynthetic['ULTIMASINC'] = rowSynthetic['ULTIMASINC'] + datetime.timedelta(days=30*month)
            rowPrev = rowSynthetic['ALTURA']
            listSyntheticData.append(rowSynthetic)

        # Verifica se essa arvore pode ter um evento
        if (rowSynthetic['ID'] in list(dataframeLimitHeight['ID'])):

            # Se altura passou do limite gera um evento e simula uma poda de 2 metros
            if (rowPrev >= dataframeLimitHeight[dataframeLimitHeight['ID']==rowSynthetic['ID']].LIMITE_ALTURA.values[0]):
                print('ID DA ARVORE --- : ' + str(rowSynthetic['ID']))
                print("ALTURA DA ARVORE: " + str(rowPrev) + " LIMITE : " + str(dataframeLimitHeight[dataframeLimitHeight['ID']==rowSynthetic['ID']].LIMITE_ALTURA.values[0]))
                rowPrev = rowPrev - 2
                listEvent.append([rowSynthetic['ULTIMASINC'] ,
                                rowSynthetic['ID'],
                                rowPrev,
                                dataframeLimitHeight[dataframeLimitHeight['ID']==rowSynthetic['ID']].LIMITE_ALTURA.values[0]
                                ])

            # print(row['ALTURA'] )

        rowPrev=0
    dataframeSyntheticData = pd.DataFrame(listSyntheticData)
    dataframeEvent = pd.DataFrame(listEvent, columns=['DATA', 'ID', 'ALTURA_AT', 'ALTURA_LIMITE'])
    return dataframeSyntheticData, dataframeEvent
```

Fonte: Do autor (2023)

Por fim podemos observar o crescimento das árvores até o evento de poda e sua retomada de crescimento posterior a isso. Também foi possível aferir com quantos meses ocorreria esse evento de poda.

Figura 30 – Gráfico para predição do momento ideal de poda

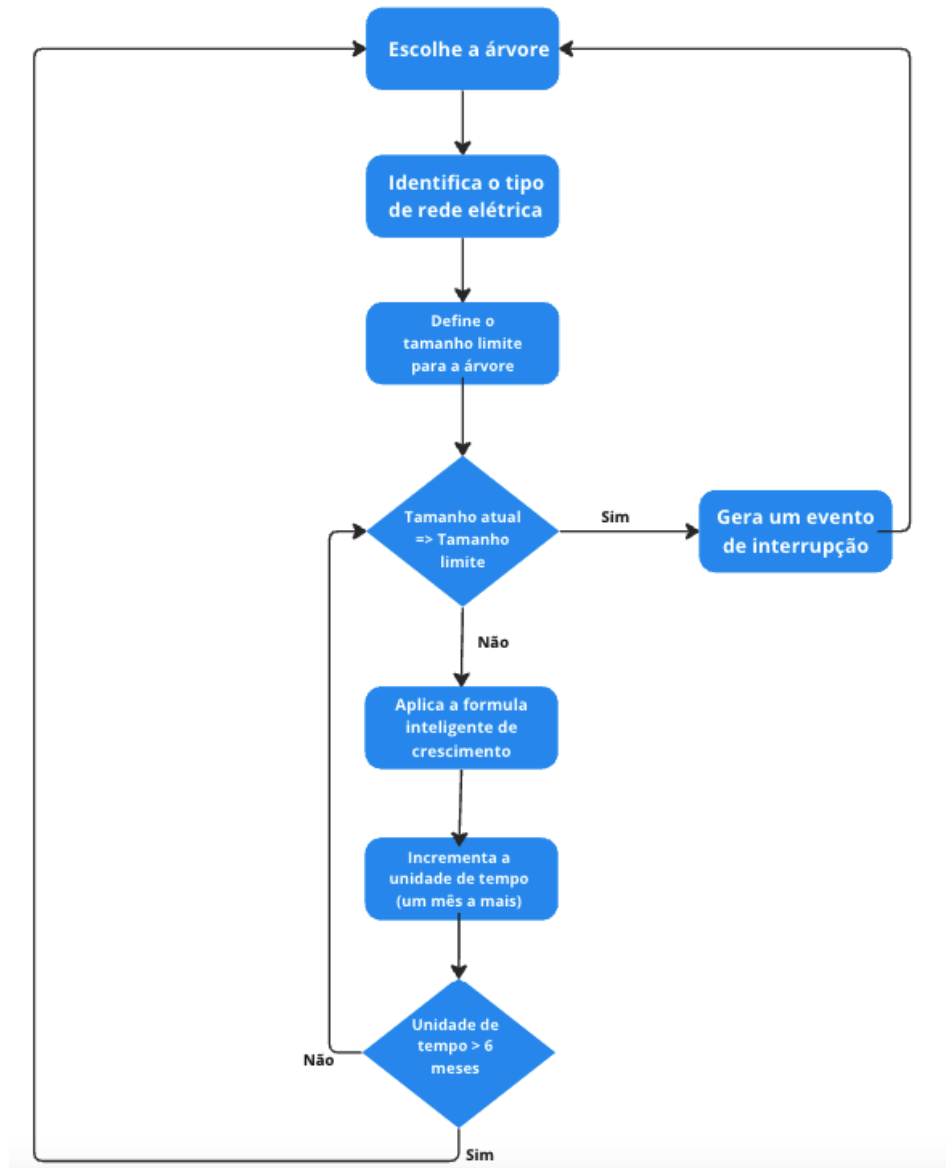


Fonte: Do autor (2023)

Com isso, é possível prever que o momento ideal de poda das árvores. Exemplificando a árvore de identificador 1567, que chegou em seu tamanho limite permitido em 08/2021.

Na Figura 34 é possível visualizar a metodologia generalizada.

Figura 31 – Fluxo do algoritmo



Fonte: Do autor (2023)

#### 4 AFERIÇÃO DOS RESULTADOS

Para a validação da abordagem inteligente desenvolvida se fez necessário a aplicação da fórmula apresentada, para simulação do crescimento dos indivíduos do grupo jacarandá. Antes de aplicar a fórmula de crescimento ao longo dos 12 meses, foi validada sua aplicação por meio das métricas mais comuns usadas para medir a precisão de variáveis contínuas. As métricas utilizadas foram erro médio absoluto (*MAE*), erro médio quadrático (*MSE*) e erro quadrático médio (*RMSE*). Autores como Ahmed (2010) e Bontempi (2012) mostram as vantagens de utilizar as métricas como erro médio absoluto, erro médio quadrático e erro

quadrático médio, como indicador de qualidade para avaliação de preditores para variáveis contínuas.

As fórmulas para o cálculo das métricas podem ser observadas em (1), (2) e (3).

$$MAE = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n |y - \hat{y}| \quad (1)$$

$$MSE = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n (y - \hat{y})^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n (y - \hat{y})^2} \quad (3)$$

Onde: n é o número de amostras, y é o valor real e  $\hat{y}$  é o valor predito pela fórmula.

Os valores das métricas encontradas com a aplicação da fórmula podem ser observados na Tabela 1. As métricas apontam que é possível utilizar da fórmula apresentada, sendo assim, a abordagem inteligente desenvolvida pode ser validada.

Tabela 1 - Métricas de avaliação

<b>Métrica</b>	<b>Resultado</b>
<i>Erro médio absoluto (MAE)</i>	0,120
<i>Erro médio quadrático (MSE)</i>	0,022
<i>Erro quadrático médio (RMSE)</i>	0,013

Fonte: Do autor (2023)

## 5 CONCLUSÃO

O contato entre árvores e linhas elétricas é uma questão desafiante em ambientes urbanos no Brasil, impulsionado, especialmente, pelo clima tropical do país, que propicia o crescimento rápido das plantas. Todavia é possível prevenir este problema com uma detecção antecipada, possibilitando a notificação de equipes de poda para ação preventiva.

A metodologia proposta se mostrou satisfatória e teve sua eficácia comprovada para a antecipação do momento ideal de poda em áreas arborizadas. Com uso da metodologia e algoritmo desenvolvidos, foi possível simular o ponto de contato entre as árvores e as linhas elétricas, ocasionando a identificação do momento mais apropriado para a poda pela equipe de manejo. A metodologia definiu como tratar e normalizar os dados utilizando a linguagem *Python*. Também foi possível obter a equação de crescimento da arborização de espécie Jacarandá, para uso no algoritmo que monitora o crescimento da arborização e prevê o momento ideal da poda.

Além disso a acurácia do modelo preditivo foi satisfatória utilizando três modelos matemáticas para aferição em cenários de predição, sendo eles *MSE*, *MAE* E *RMSE*.

Refletindo sobre a evolução da pesquisa deste trabalho e seus desafios técnicos, principalmente na obtenção e tratamento dos dados, é satisfatório seu resultado.

Para trabalhos futuros e para aplicações em larga escala, desde que tenha viabilidade econômica, se mostra interessante o alinhamento com outras tecnologias como a usada por Anett; Cserep (2021) através da tecnologia *LiDAR*, propondo uma metodologia de classificação de árvores e suas dimensões, desta forma é possível a aplicação deste algoritmo em diferentes regiões de forma dinâmica, além de minimizar o erro. Ainda visando trabalhos futuros, desde que seja possível relacionar e registrar o ponto exato de conflito da rede elétrica com uma arborização específica que gerou o conflito, torna viável a aplicação de *machine learning* para possíveis melhores predições.

Os modelos de *machine learning* que poderão ser utilizados destacam-se o ARIMA, rede neurais artificiais recorrentes LSTM e *Prophet*, estas abordagens podem mostrar resultados ainda mais expressivos como evidenciado por Makridakis (2018), Ahmed (2010) e Bontempi (2012). Onde são aplicados modelos de *machine learning* para problemas de 'forecast'. Ainda sobre trabalhos futuros, se mostra importante um estudo detalhado da economia efetuada com a aplicação da metodologia.

## REFERÊNCIAS

- AHMED, Nesreen K. *et al.* An Empirical Comparison of Machine Learning Models for Time Series Forecasting. <https://doi.org/10.1080/07474938.2010.481556>, [s. l.], v. 29, n. 5, p. 594–621, 2010a.
- APOLINÁRIO, Liliani A.V.; MANTOVANI, José R.Sanches. Modelo de programação matemática para controle do crescimento da vegetação sob redes de distribuição de energia elétrica. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 284–295, 2011.
- BONTEMPI, Gianluca; BEN TAIEB, Souhaib; LE BORGNE, Yann Aël. Machine learning strategies for time series forecasting. **Lecture Notes in Business Information Processing**, [s. l.], v. 138 LNBIP, p. 62–77, 2013.
- BURDEN, Dan. Urban Street Trees 22 Benefits. [s. l.], 2006. Disponível em: [https://www.walkable.org/download/22\\_benefits.pdf](https://www.walkable.org/download/22_benefits.pdf)
- CARRIÃO, S L *et al.* Desenvolvimento de um Sistema de Informação para Regionalização do Controle e Monitoramento de Vegetação sob Redes Elétricas-Ano II. [s. l.], Acesso em: 22 ago. 2023.
- CESAR, Rodrigo; MACIEL, Nunes. Predição do teor de clorofila na cultura do arroz irrigado utilizando imagens aéreas e redes neurais artificiais. [s. l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/227116>. Acesso em: 16 set. 2023.
- CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. Introduction to Algorithms. [S.l.]: The MIT Press, 2009.
- CHAI, T; DRAXLER, R R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?- Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geosci. Model Dev**, [s. l.], v. 7, p. 1247–1250, 2014. Disponível em: [www.geosci-model-dev.net/7/1247/2014/](http://www.geosci-model-dev.net/7/1247/2014/). Acesso em: 22 ago. 2023.
- CLARIVATE. **Web of Science**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://clarivate.com/products/scientific-and-academic-research/research-discovery-and-workflow-solutions/webofscience-platform/>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- CROTTI, Yuri. Impacto da utilização das novas tecnologias da informação e comunicação na qualidade de frutas conservadas em atmosfera controlada. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216371>. Acesso em: 16 set. 2023.
- C. T. S. A, “Imagens de satélite e gestão de podas : uma solução inovadora Distribuidora de Energia SA Pedro Henrique Morais Lemes Energisa Sergipe Distribuidora de Energia SA,” **XXIII Semin. Nac. Distrib. Energ. Elétrica SENDI**, no. November 2018, pp. 1–12, 2018.
- DARVENIZA, Mat; LIMBOURN, G. J.; PRENTICE, S. A. Line Design and Electrical Properties of Wood. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, [s. l.], v. PAS-86, n. 11, p. 1344–1356, 1967. Acesso em: 16 set. 2023.

- DUBAYAH, Ralph O.; DRAKE, Jason B. Lidar Remote Sensing for Forestry. **Journal of Forestry**, [s. l.], v. 98, n. 6, p. 44–46, 2000. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1093/jof/98.6.44>. Acesso em: 5 set. 2023.
- ELSEVIER. **Scopus**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.scopus.com>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- ESRI 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: **Environmental Systems Research Institute**.
- Fan, Z., Zhang, D., et al. (2020). **Evaluating the Performance of Empirical Growth-and-Yield Models for Thinning Longleaf Pine Stands in the Southeastern United States**. *Forest Science*, 66(2), 135-147.
- FERREIRA, Hamilton Melo. **Uso de ferramentas de aprendizado de máquina para prospecção de perdas comerciais em distribuição de energia elétrica**. 2008. - Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2008.
- FRÓES, Carlos A *et al.* Sistema de Gestão e Manejo da Arborização Urbana ao Longo das Redes de Distribuição. [s. l.], Acesso em: 22 ago. 2023.
- GAZZEA, Michele *et al.* Automated Power Lines Vegetation Monitoring Using High-Resolution Satellite Imagery. **IEEE Transactions on Power Delivery**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 308–316, 2022. Acesso em: 5 set. 2023.
- GIALLUCA, Vernei; CAMARGO, Carlos. Sistema de Otimização e Gestão de Podas de Árvores Ambientalmente Correta para Minimização das Interrupções de Energia Elétrica. *Em: , 2016, Curitiba. XXII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - SENDI 2016* . Curitiba: [s. n.], 2016.
- Hellqvist, C., Nilsson, Ö., et al. (2012). A dynamic model of tree growth for Norway spruce stands in Sweden." *Forest Ecology and Management*, 273, 62-69.
- Google Earth 7.1 (2023), Geographic Information System, **Google, Keyhole.inc**. Disponível em: < <https://earth.google.com/web/>>.
- IEEE XPLORE DIGITAL LIBRARY. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplorehelp/overview-of-ieee-xplore/about-ieee-xplore>. Acesso em: 22 ago. 2023.
- itreetools.org 2006, Geographic Information System, **USDA Forest Service** Disponível em: <<https://www.itreetools.org>>.
- Jason R. Parent, Thomas H. Meyer, John C. Volin, Robert T. Fahey, Chandi Witharana, An analysis of enhanced tree trimming effectiveness on reducing power outages, *Journal of Environmental Management*, Volume 241, 2019, Pages 397-406,ISSN 0301-4797, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.027>.
- LACOMMARE, Kristina Hamachi; ETO, Joseph H; LAWRENCE, Ernest Orlando. Understanding the Cost of Power Interruptions to U.S. Electricity Consumers Environmental Energy Technologies Division. [s. l.], 2004. Disponível em: <http://eetd.lbl.gov/ea/EMP/EMP-pubs.html>. Acesso em: 5 set. 2023.

Liu, Q., Fang, Y., et al. (2015). "Modeling diameter growth of mixed-species multi-cohort forests in Northeastern China using hierarchical Bayesian modeling." *Forest Ecology and Management*, 347, 65-74.

MA, Xiaogang. Knowledge graph construction and application in geosciences: A review. **Computers & Geosciences**, [s. l.], v. 161, p. 105082, 2022. Acesso em: 16 set. 2023.

MAKRIDAKIS, Spyros; SPILIOTIS, Evangelos; ASSIMAKOPOULOS, Vassilios. Statistical and Machine Learning forecasting methods: Concerns and ways forward. **PLOS ONE**, [s. l.], v. 13, n. 3, p. e0194889, 2018. Disponível em: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0194889>. Acesso em: 22 ago. 2023.

MAREK, Carla Fernanda. **Os impactos da arborização viária sobre a rede de distribuição de energia elétrica: estudo de caso da Zona 7 de Maringá/PR**. 2008. - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2008.

McPherson, E.G.; Simpson, J.R.; Peper, P.J.; Aguaron, E. 2008. Urban Forestry and Climate Change. Albany, CA: USDA Forest Service, Pacific Southwest Research Station.

Nieuwenhuis, M., Bontemps, J. D., et al. (2016). "A comprehensive review of individual tree growth models: Models, data and prospects." *Forest Ecology and Management*, 373, 21-31.

NILSSON, N.J. Principles of artificial intelligence. **Springer Science & Business Media**; 1982 May 1.

NOWAK, David J. Atmospheric Carbon Reduction by Urban Trees. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 207–217, 1993. Acesso em: 16 set. 2023.

NUMPY. **A fundamental package for scientific computing with Python**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://numpy.org/>. Acesso em: 16 set. 2023.

OUSSOUS, Ahmed et al. Big Data technologies: A survey. **Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences**, [s. l.], v. 30, n. 4, p. 431–448, 2018a. Acesso em: 16 set. 2023.

OpenTreeMap.org 2018, **Geographic Information System, Open Source**, US Forest Service Disponível em: <<https://www.opentreemap.org/>>.

PPGTIC - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://ppgtic.ufsc.br/linhas-de-pesquisa/>. Acesso em: 16 set. 2023.

QGIS.org 2023. QGIS Geographic Information System. Open Source, Geospatial Foundation Project. Disponível em: < [https://qgis.org/pt\\_BR/site/](https://qgis.org/pt_BR/site/)>.

SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977. Acesso em: 16 set. 2023.

SCHMIDTHALER, Michael; REICHL, Johannes. Assessing the socio-economic effects of power outages ad hoc. **Computer Science - Research and Development**, [s. l.], v. 31, n. 3, p.



157–161, 2016. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00450-014-0281-9>. Acesso em: 16 set. 2023.

SHAPELY · PYPI. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://pypi.org/project/shapely/>. Acesso em: 16 set. 2023.

SIPSER, Michael. Introduction to the Theory of Computation. **ACM Sigact News**, v. 27, n. 1, p. 27-29, 1996.

STOJANOVA, Daniela *et al.* Estimating vegetation height and canopy cover from remotely sensed data with machine learning. **Ecological Informatics**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 256–266, 2010. Acesso em: 22 ago. 2023.

SUN, Ziheng *et al.* A review of Earth Artificial Intelligence. **Computers & Geosciences**, [s. l.], v. 159, p. 105034, 2022. Acesso em: 16 set. 2023.

VELASCO, Giuliana Del Nero. Arborização viária X sistemas de distribuição de energia elétrica: avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos. 2003. - **Universidade de São Paulo**, Piracicaba, 2003.

WILLMOTT, Cort J; MATSUURA, Kenji. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. **Climate Research**, [s. l.], v. 30, n. 1, p. 79–82, 2005. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/24869236>.

Whitehouse, S., Comeau, P., et al. (2019). "Development of a Dynamic Growth and Yield Model for Managed Stands of White Spruce in Northern British Columbia." *Canadian Journal of Forest Research*, 49(10), 1165-1175.

ZHANG, Jingfeng *et al.* Measuring the Distance between Trees and Power Lines under Wind Loads to Assess the Heightened Potential Risk of Wildfire. **Remote Sensing 2023**, Vol. 15, Page 1485, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 1485, 2023b. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/6/1485/htm>. Acesso em: 5 set. 2023.