

**Universidade de Brasília – UnB**  
**Faculdade de Tecnologia – FT**  
**Departamento de Engenharia Florestal – EFL**

Mariana Pacheco de Almeida

Predição da altura de *Tectona grandis* Linn F. por meio de modelos genéricos e redes neurais artificiais

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Florestal.

Orientador: Eder Pereira Miguel

Brasília

(2020)

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho, com muito amor e saudade, a minha avó, Maria Conceição (in memoriam), que foi exemplo de afeto, ternura e resistência.

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço, principalmente, aos meus pais, Cícero e Elma, que me concederam condições financeiras e emocionais necessárias para realização deste curso. Os agradeço por me darem o luxo de viver minhas escolhas e fazerem com que eu possa trilhar meus caminhos, buscar os meus objetivos e sonhos, sabendo que tenho, sempre tive e sempre terei todo o apoio necessário.

Às minhas irmãs, Marília e Bruna, por me encorajarem e serem exemplos, pelo afeto e paciência, sem os quais não seria possível a conclusão desta etapa.

Aos meus familiares, pelo carinho, atenção e, principalmente, pelos momentos de distração. Agradeço, em especial, ao meu avô, Rui Batista, que foi, durante todo este processo, afetuoso, carinhoso, conselheiro e incentivador.

Ao professor dr. Eder, por qual nutro admiração, por ter aceito conduzir o meu trabalho de pesquisa, pela confiança e ensinamentos.

Ao professor Ricardo e doutorando Mario Santos, pelas contribuições e considerações apresentadas ao longo da execução deste trabalho, bem como, pelo aceite em participar da banca deste trabalho.

Aos amigos, profissionais e colegas do departamento de Engenharia Florestal da Universidade de Brasília, por terem sido facilitadores do conhecimento adquirido durante a graduação. Em especial, aos professores doutores Álvaro, Reuber e Eraldo, por terem me orientado na condução de outros trabalhos e atividades durante a graduação.

## RESUMO

Na Amazônia oriental, ainda que a *Tectona grandis* seja comumente empregada, tem-se uma escassez de estudos direcionados à esta região e capazes de fundamentar o manejo florestal destes povoamentos. Com isso, investigou-se o desempenho dos modelos genéricos e das redes neurais artificiais (RNA) na predição da altura total de árvores de *T. grandis* em um povoamento florestal na Amazônia oriental. Neste povoamento foram conduzidos inventários florestais contínuos, onde foram mensurados a altura total e o diâmetro medido à 1,30 m do solo (dap) dos indivíduos amostrados. A predição da altura foi feita por modelos não lineares, lineares e RNA's *Multilayer Perceptron*. Estes métodos utilizaram as variáveis dap, idade e, ou, diâmetro médio quadrático (dg). Utilizou-se 70% dos dados para ajuste dos modelos e treinamento das redes e restante aplicado para a validação dos métodos de predição. A avaliação da precisão dos métodos analisados foi feita por meio do erro padrão residual absoluto e percentual da estimativa ( $Syx$  e  $Syx \%$ ), do coeficiente de correlação ( $r$ ) e da análise gráfica de resíduos. Foi utilizado ainda a diferença agregada e análise de variância (ANOVA) para comparar os modelos e as redes. Baseado no coeficiente de correlação, concluiu-se que as variáveis independentes estudadas são capazes de explicar o comportamento da altura dos indivíduos de *T. grandis*. O modelo linear foi igualmente e, ou, superior aos modelos não lineares. Ainda que não houve diferença significativa e os dois métodos estimaram as alturas precisamente, as RNA's, principalmente as que englobam dg, apresentaram indicadores estatísticos superiores em relação à regressão.

**Palavras-chaves:** Teca, modelagem, manejo florestal, plantios clonais, Pará.

## ABSTRACT

In the eastern Amazon, although *Tectona grandis* is commonly used, there is a scarcity of studies aimed at this region to support the forest management of these stands. With this, the performance of generic models and artificial neural networks (ANN) in the prediction of the total height of *T. grandis* trees in a forest stand in the Eastern Amazon was investigated. In this stand, continuous forest inventories were conducted, where the total height and the diameter measured at 1.30 m from the soil (dbh) of the sampled individuals were measured. The height prediction was made by nonlinear, linear models and RNA's Multilayer Perceptron. These methods used the variables dbh, age and / or mean square diameter (dg). 70% of the data were used to adjust the models and train the networks and the remainder applied to validate the prediction methods. The evaluation of the precision of the analyzed methods was done through the absolute residual standard error and percentage of the estimate (Syx and Syx%), the correlation coefficient (r) and the graphic analysis of residues. The aggregated difference and analysis of variance (ANOVA) were also used to compare the models and networks. Based on the correlation coefficient, it was concluded that the independent variables studied are able to explain the height behavior of individuals of *T. grandis*. The linear model was also and, or, superior to non-linear models. Although there was no significant difference and the two methods estimated the heights precisely, the ANNs, especially those that comprise dg, presented superior statistical indicators in relation to the regression.

Keywords: Teak, modeling, forest management, clonal planting, Pará.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
2. OBJETIVO.....	10
2.1. OBJETIVO GERAL.....	10
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
3.1. <i>TECTONA GRANDIS</i> .....	10
3.2. ALTURA.....	16
3.3. MODELOS GENÉRICOS.....	18
3.4. REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
4.1. ÁREA DE ESTUDO E CARACTERIZAÇÃO DOS POVOAMENTOS.....	22
4.2. COLETA DE DADOS.....	23
4.3. VARIÁVEIS INDEPENDENTES.....	23
4.4. MODELAGEM DA ALTURA TOTAL USANDO REGRESSÃO.....	24
4.5. MODELAGEM DA ALTURA TOTAL USANDO REDES NEURAI ARTIFICIAIS.....	25
4.6. ANÁLISE DE DADOS.....	26
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	27
5.1. ESTATÍSTICA DESCRITIVA.....	27
5.2. CORRELAÇÃO E MULTICOLINEARIDADE.....	27
5.3. MODELAGEM DA ALTURA UTILIZANDO REGRESSÃO.....	28
5.4. MODELAGEM DA ALTURA UTILIZANDO RNA.....	31
5.5. COMPARAÇÃO ENTRE AS REGRESSÕES E AS RNA'S.....	34
6. CONCLUSÃO.....	36
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38
8. ANEXOS.....	52

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Volume médio de tora de <i>Tectona grandis</i> (m <sup>3</sup> /ano) exportado, entre 2005 e 2014 (KOLLERT; WALOTEK, 2015).....	13
Figura 2: Volume médio de madeira serrada de <i>Tectona grandis</i> (m <sup>3</sup> /ano) exportado, entre 2005 e 2014 (KOLLERT; WALOTEK, 2015).....	13
Figura 3: Área de estudo situada no município Capitão Poço, Pará.....	25
Figura 4: Representação gráfica da correlação entre alturas observadas e preditas (A), distribuição dos erros de estimativa (B) e histograma da frequência de erro relativo gerado pela equação não linear 2 (C), ajustada aos dados dos povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil.....	29
Figura 5: Representação gráfica da correlação entre alturas observadas e preditas (A), distribuição dos erros de estimativa (B) e histograma da frequência de erro relativo gerado pela rede neural artificial MLP 7-10-1 (C), ajustada aos dados dos povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil.....	31
Figura 6: arquitetura da RNA selecionada e treinada aos dados dos povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil.....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modelos hipsométricos ajustados para a estimativa da variável altura total. .	25
Tabela 2: Estatística descritiva dos povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil. ....	27
Tabela 3: Matriz de correlação entre as variáveis independentes (dap, dg e idade) e dependente (ht) obtidas em povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil. ....	28
Tabela 4: Análise de multicolinearidade entre as variáveis independentes obtidas em povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil. ....	28
Tabela 5: Medidas de precisão dos modelos hipsométricos ajustados aos dados dos povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil. ....	30
Tabela 6: Medidas de precisão das redes neurais artificiais treinadas para os dados dos povoamentos clonais <i>T. grandis</i> na Amazônia oriental, Brasil. ....	31
Tabela 7: análise da variância (ANOVA) aplicada sobre a alturas reais e estimadas pelo modelo de regressão e rede neural artificial selecionados. ....	35

## 1. INTRODUÇÃO

A *Tectona grandis* (Linn F.), popularmente denominada teca, é uma espécie originária do sudeste asiático e do subcontinente índico (KAOSA-ARD, 1989; PANDEY; BROWN, 2000; PELISSARI et al., 2014; DEB et al., 2017). A espécie ganha destaque em virtude de suas características madeireiras representando uma alternativa para o abastecimento das indústrias do âmbito florestal sendo utilizada na construção civil e produção de móveis de luxo (LAMPRECHT, 1990; REVISTA MADEIRA, 2009; PELISSARI et al., 2014).

Em virtude da degradação das florestas nativas, o Mianmar, um dos mais maiores produtos de *T. grandis*, reduziu sua participação na comercialização desta madeira (ROSHETKO, 2013; MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; WALOTEK, 2015). Esta diminuição possibilitou a expansão dos plantios desta espécie no mundo, em especial, no continente africano e sul-americano (CAMINO; MORALES, 2013; MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; WALOTEK, 2015). Tem-se, atualmente, cerca de 6887 mil hectares destinado ao plantio de *T. grandis* distribuído entre os continentes asiático (6071 mil hectares), africano (538 mil hectares) e sul-americano (278 mil hectares) (MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; KLEINE, 2017). No atual momento, tem-se no Brasil aproximadamente 94 mil hectares destinados ao plantio desta espécie (IBA, 2019).

No Pará, a espécie estudada é, comumente, plantada em monocultivos para suprir a demanda moveleira e a construção náutica (ROCHA et al., 2015). A *T. grandis* é ainda plantada em associação com outras espécies arbóreas para compor sistemas silvipastoris (MANESCHY, 2009; ROCHA et al., 2015; SILVA et al., 2017).

Para que se possa dispor de informações para assessorar as deliberações no âmbito florestal, e assim, otimizar a produção e suprir as demandas supracitadas, é crucial que haja a mensuração e a presunção dos estoques florestais de *T. grandis* (LEITE; ANDRADE, 2002; CAMPOS; LEITE, 2017; LAURO et al., 2018). Para que isto ocorra é importante dispor do diâmetro, da altura, da área basal e do volume das árvores inseridas no povoamento (SILVA; LOPES, 1984; MEUNIER et al., 2001; SOARES et al., 2012; SANQUETTA et al., 2014; CAMPOS; LEITE, 2017; LAURO et al., 2018).

Ao dispor da altura das árvores inseridas no povoamento florestal é possível, associado às outras variáveis, classificar o sítio florestal, estimar e verificar o

incremento volumétrico, determinar o afilamento do fuste. No entanto, a medição desta variável, em especial em povoamentos densos e extensos, torna as atividades de manejo florestal demoradas e onerosas, portanto, comumente, inviáveis economicamente (MENDONÇA et al, 2011; MOREIRA et al., 2015; KOHLER et al., 2017). Em razão disso utilizam-se, frequentemente, modelos hipsométricos, isto é, equações que associam a altura em função do diâmetro (SOARES et al., 2011; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; CAMPOS; LEITE, 2017). Ressalta-se ainda que, modelos genéricos, que relacionam também outros aspectos, são capazes ainda de, ao estimar a altura, contemplar a diversidade de características do povoamento (BARROS et al., 2002; FILHO et al., 2010).

Recentemente, tem-se utilizado também, com esta finalidade, redes neurais artificiais (RNA) (BINOTI et al., 2013; MARTINS et al., 2016; CAMPOS et al., 2016; BARREIROS et al., 2019; BUENO et al., 2020; COSTA-FILHO et al., 2020). Este método é constituído por modelos computacionais, que se assemelham ao sistema nervoso de seres vivos (HAYKIN, 2001; MAEDA et al., 2009; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014; NADIKATTU, 2017; TOSUN; DINCER, 2017). As RNA's têm a capacidade de adquirir e gerir conhecimento por meio de informações disponibilizadas (HAYKIN, 2001; BRAGA et al., 2014; TOSUN; DINCER, 2017). Além disso, a rede é caracterizada por representar um conjunto de unidades de processamento, que são formadas por neurônios artificiais. Estes neurônios são associados por variadas interconexões, denominados sinapses artificiais (CERQUEIRA et al., 2001; ROCHA et al, 2013; SILVA et al., 2010).

Destaca-se que na literatura é facilmente encontrado estudos que avaliam a capacidade de modelos de regressão e redes neurais artificiais para estimar a altura de espécies comuns, tais como, do gênero *Pinus e Eucalyptus*. Entre estas pesquisas cita-se Binoti et al. (2013), Martins et al. (2016), Campos et al. (2017), Bueno (2017), Barreiros et al. (2019), Costa-Filho et al. (2020). No entanto, tem-se escassez de estudos neste âmbito sobre outras espécies, tal como a *T. grandis*, como mencionado por VENDUSCOLO et al. (2017).

Posto isso, evidencia-se a necessidade de realizar estudos deste âmbito direcionados à região da Amazônia Oriental. Pois, em conformidade com Santos et al. (2020), nesta localidade tem-se ainda uma carência de informações disponíveis para embasar o

manejo florestal em povoamento de *T. grandis*. Pesquisas focadas em plantios clonais desta espécie, nesta região, são ainda mais escassos.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo geral**

Avaliar o desempenho dos modelos genéricos e das redes neurais artificiais na predição da altura de indivíduos de um povoamento clonais de *T. grandis* na Amazônia oriental.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Incorporar aos modelos genéricos e às redes neurais artificiais variáveis preditoras, como o diâmetro, o diâmetro quadrático médio e a idade;
- Elaborar, ajustar ou treinar, comparar e selecionar um modelo genérico ou rede neural artificial (RNA) mais adequado para estimar a altura total.
- Verificar se há diferença significativa na predição da altura por modelos genéticos e RNA.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. *Tectona grandis***

A teca (*Tectona grandis*), pertencente à família botânica Verbenaceae, é originária da Índia, de Mianmar, da Tailândia e do Laos e naturalizada em Java e na Indonésia (KAOSA-ARD, 1989; PANDEY; BROWN, 2000; PELISSARI et al., 2014; DEB et al., 2017). Esta espécie consiste em uma árvore pioneira, caracterizada por ter copa circular e altura elevada (PANDEY; BROWN, 2000; KRISHNAPILLAY, 2000; LORENZI, 2003). Em condições ideais, esta espécie desenvolve tronco ereto de mais de 25 metros (PANDEY; BROWN, 2000; KRISHNAPILLAY, 2000).

A espécie florestal estudada qualifica-se como uma madeira mundialmente requisitada em virtude de suas características que possibilitam o multiuso (PANDEY; BROWN, 2000; CÁCERES FLORESTAL, 2006; REIS; PALUDZYSZYN FILHO, 2011; MIDGLEY et al., 2015). Esta madeira apresenta elevada resistência às intempéries e aos ataques de xilófagos, exceto aos organismos marinhos (KAOSA-ARD, 1989; MOTTA et al., 2013; IPT, 2019). A *T. grandis* é, ainda, facilmente aplainada, torneada, furada, lixada e colada (KAOSA-ARD, 1989; FIGEUEIREDO,

2005; CAMINO; MORALES, 2013; IPT, 2019). Entretanto, em função da sílica, as ferramentas utilizadas nestas atividades podem ser desgastadas com facilidade (KAOSA-ARD, 1989; NORDAHLIA et al., 2014; IPT, 2019).

A secagem desta madeira pode ser feita de modo natural ou artificial. Ressalta-se que este processo acarreta apenas pequenos defeitos em virtude do baixo coeficiente de contração e boa estabilidade (MATRICARDI, 1989; CÁCERES FLORESTAL, 2006; SANTOS et al., 2018; IPT, 2019). No que diz respeito ao aspecto estético, a *T. grandis* possui coloração e grã comumente desejáveis (SCHUHLI; PALUDZYSZYN, 2010; PANGASTUTI et al., 2018; IPT, 2019).

A madeira oriunda da árvore supracitada é, frequentemente, empregada em aplicações pesadas, na confecção de navios e de produtos nobres (PANDEY; BROWN, 2000; REVISTA MADEIRA, 2009; KOLLERT; WALOTEK, 2015). Tem-se ainda utilizado esta madeira para confecção de objetos de decoração, componentes e materiais de construção (KAOSA-ARD, 1989; CÁCERES FLORESTAL, 2006; MIDGLEY et al., 2015).

Caracterizada como uma das principais espécies madeireiras mundiais, a procura por *T. grandis* tem sido maior que à oferta disponível (VEIT, 1996; GOH e MONTEUUIS, 2005; MIDGLEY et al., 2015). De acordo com Kollert e Kleine (2017), a *T. grandis* representa 3% do valor comercial global de madeira. Aponta-se ainda que 7% do volume madeireiro mundial comercializado dizem respeito às toras de *T. grandis* (KOLLERT E WALOTEK, 2015).

Aponta-se que esta espécie pertence a um pequeno grupo de árvores usadas para produzir artefatos madeireiros luxuosos que se desenvolvem bem em plantações (LAMPRECHT, 1990; REVISTA MADEIRA, 2009; PELISSARI et al., 2014). Ainda que a qualidade dos produtos oriundos de florestas artificiais seja normalmente inferior aos produtos de florestas nativas, destaca-se que em plantações de mais de 50 anos essas discrepâncias são mínimas (KOLLERT; KLEINE, 2017).

No entanto, para que o plantio seja bem-sucedido é necessário dispor de solos bem drenados, pouco ondulados, profundos e férteis (KRISHNAPILLAY, 2000; PANDEY; BROWN, 2000; FIGUEIREDO, 2001; CÁCERES FLORESTAL, 2006). A localidade deve apresentar ainda precipitações anuais de 1.250 a 3.750 mm e temperaturas mínimas e máximas variando entre, respectivamente, 13 a 17 °C e 39 a 43 °C (KAOSA-

ARD, 1989; PANDEY; BROWN, 2000; CORNELIO, 2020). Contendo estes aspectos, a *T. grandis* pode ainda ser cultivada em diversos tipos de solos e formações geológicas (KOLLERT; CHERUBINI, 2012; WAHONOU et al., 2017). Assim sendo, caracterizam-se as zonas trópicas como regiões potenciais para o desenvolvimento desta espécie (CÁCERES FLORESTAL, 2006; KOLLERT; CHERUBINI, 2012).

Apesar da relevância mundial, dados de produtividade global de *T. grandis* ainda são escassos. Segundo Pandey e Brown (2000), em 1932 e 1936, foram feitos os primeiros levantamentos sobre a distribuição geográfica destes plantios. Nestas pesquisas indicou-se, inicialmente, que as plantações de *T. grandis* localizavam em Java e na Indonésia, posteriormente concluiu-se que esta espécie se situava também na Índia, em Bangladesh e no Mianmar (PANDEY; BROWN, 2000).

Após isto, alguns outros estudos foram feitos entre 1975 e 2005. Ainda que não possam ser inteiramente comparadas, devido à aplicação de metodologias distintas, estas pesquisas servem para sugerir tendências e disponibilizar informações úteis (PANDEY; BROWN, 2000).

Em conformidade com os estudos referenciados, na década de 70, havia no mundo, distribuído em 34 países, 1.300.000 hectares de floresta plantada de *T. grandis*. Demonstra-se que cerca de 90% desta área localizavam-se no continente asiático, 8% na África e 1% distribuía-se no Caribe, na América Central, na Oceania e na América do Sul (KEOGH, 1979; PANDEY; BROWN, 2000; KOLLERT; CHERUBINI, 2012).

Nos anos seguintes houve um acréscimo de área plantada de *T. grandis*, alcançando, em 1995, um somatório de 2,2 milhões de hectares (DUPUY e VERHAEGEM, 1993; KOLLERT; CHERUBINI, 2012). Neste ano, 93% do plantio situavam-se na Ásia, 5% na África, 1% na América Central e o restante estava distribuído no Caribe, na Oceania e na América do Sul (PANDEY; BROWN, 2000; KOLLERT; CHERUBINI, 2012).

Nos anos 2000, estes plantios se expandiram, totalizando 5.716.000 hectares (FAO, 2001; KOLLERT; CHERUBINI, 2012). Neste ano, a produção asiática permaneceu notória, correspondendo 94% dos plantios mundiais. Na África houve um acréscimo de áreas plantadas, no entanto, sua participação mundial diminuiu para 4%. As outras localidades, ainda que tenham destinado mais áreas a este plantio,

permaneceram com a mesma relevância dos anos anteriores (PANDEY; BROWN, 2000; KOLLERT; CHERUBINI, 2012).

Em conformidade com diversas estimativas, há, neste momento, entre 4,35 a 6,89 milhões de hectares de floresta plantada de *T. grandis* no mundo (CAMINO; MORALES, 2013; KOLLERT; KLEINE, 2017; DEB et al., 2017).

Atualmente, todos os continentes exportam *Tectona grandis*, exceto o Ártico (CAMINO; MORALES, 2013; MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; WALOTEK, 2015). Atualmente, diversos países americanos, africanos e asiáticos são categorizados como relevantes na exportação de toras e madeira serrada de *T. grandis*, isto é, que comercializaram 5.000 a 1.000.000 m<sup>3</sup> de madeira para outros países, entre 2004 e 2015 (Figura 1 e 2) (KOLLERT E WALOTEK, 2015).

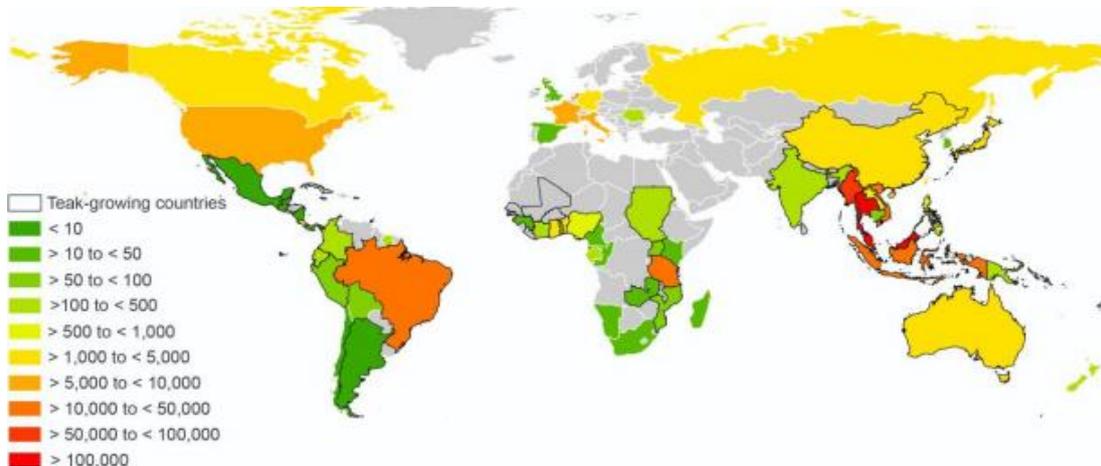


Figura 1: Volume médio de tora de *Tectona grandis* (m<sup>3</sup>/ano) exportado, entre 2005 e 2014 (KOLLERT; WALOTEK, 2015).

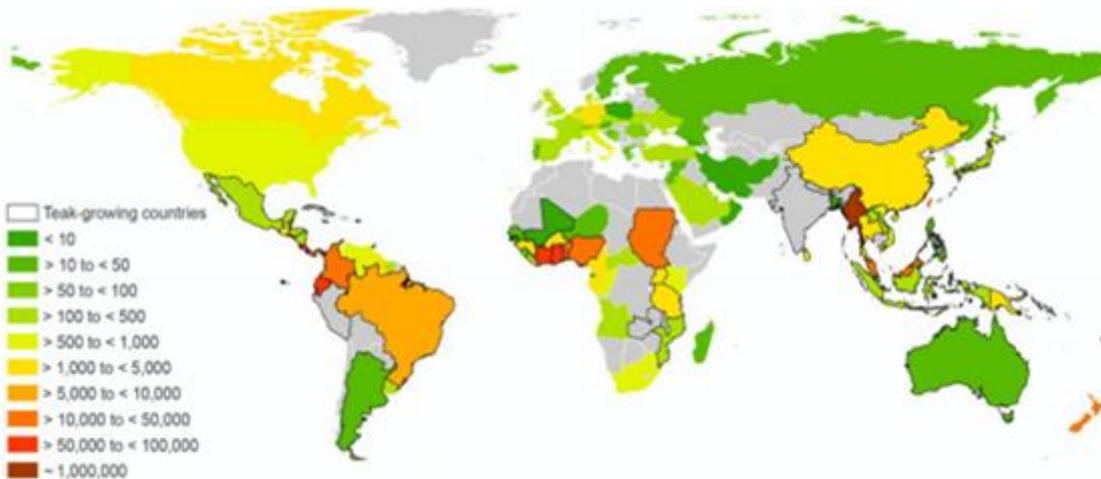


Figura 2: Volume médio de madeira serrada de *Tectona grandis* (m<sup>3</sup>/ano) exportado, entre 2005 e 2014 (KOLLERT; WALOTEK, 2015).

De forma geral, a produção mundial de *T. grandis* concentra-se no Mianmar, na Índia e na Indonésia (CÁCERES FLORESTAL, 2006; KOLLERT; WALOTEK, 2015). Apesar da elevada produtividade, a Índia, seguida da Tailândia e da China, corresponde a maior importadora de produtos oriundos desta espécie (CÁCERES FLORESTAL, 2006; RAIYANI, 2013; MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; WALOTEK, 2015). A Índia e a China apresentam ainda uma tendência a consumir ainda mais estes produtos (CÁCERES FLORESTAL, 2006; MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; WALOTEK, 2015).

Contrário à expansão do mercado, Mianmar, em 1º de abril de 2014, parou de emitir registros de exportação de madeira nativa, após notar que a exploração de florestas nativas ocasionou um aumento do desmatamento e da degradação florestal. Em razão disso, reduziu-se a participação deste país na comercialização de *T. grandis* (ROSHETKO, 2013; MIDGLEY et al., 2015; KOLLERT; WALOTEK, 2015).

Diante desta oportunidade de mercado, países africanos e latino-americanos apresentam-se como emergentes na produção e no comércio de *T. grandis* (CAMINO; MORALES, 2013; KOLLERT; WALOTEK, 2015). Entre 2003 e 2008, a África alcançou o ápice de exportação de *T. grandis*, ainda que seus produtos tenham qualidade inferior ao que é produzido na Ásia (RAIYANI, 2013; KOLLERT; WALOTEK, 2015). A América Latina, por sua vez, apresenta um crescimento constante neste ramo, havendo um aumento relevante em 2010 (RAIYANI, 2013; CAMINO; MORALES, 2013; KOLLERT; WALOTEK, 2015).

Com relação ao Brasil, afirma-se que a área destinada ao plantio de *Tectona grandis* é consideravelmente pequena quando comparada as plantações de *Eucalyptus* e *Pinus* sp. (IBA, 2019). Estes plantios, em escala comercial, concentram-se, especialmente, nos estados do Centro-Oeste e do Norte do Brasil, tais como, Mato Grosso e Pará (ABRAF, 2013; MATOS et al., 2018; VENDRUSCOLO, 2019; IBA, 2020).

Em 2010, havia no Brasil cerca de 65 hectares de floresta plantada de *T. grandis* (FAO, 2009; CAMINO; MORALES, 2013; IBA, 2019). Estima-se que, em 2012, 67,4% dos 67.693 hectares destinado ao cultivo desta espécie concentrava-se no Centro-Oeste e o restante na região Norte (ABRAF, 2013). Ressalta-se ainda que no ano seguinte, em 2013, houve um aumento substancial destes plantios, totalizando 88.270

hectares. De acordo com Kollert e Walotek (2015), em 2014, o Brasil comercializou com outros países cerca de 10.000 m<sup>3</sup> de madeira serrada de *T. grandis*, sendo caracterizado como exportador emergente. Entre 2013 e 2017, a quantidade de área destinada a este cultivo permaneceu aproximadamente inalterada. Em 2018, a plantação de *T. grandis* englobava cerca de 90 hectares, correspondendo pouco mais de 1% dos plantios florestais brasileiros (IBA, 2019).

Aponta-se ainda o Brasil como um dos principais fornecedores de madeira serrada de *T. grandis* da Índia (KOLLERT; WALOTEK, 2015). Evidencia-se também que por causa das práticas de manejo, das condições edáficas e climáticas, no país, o ciclo de corte desta árvore reduziu 55 anos, sendo, atualmente, de 25 anos (BEZERRA, 2009; IPEF, 2019).

No Amazonas, a expansão deste cultivo foi facilitada por experimentos realizados pela EMBRAPA. Esta instituição afirma ainda que a associação de *T. grandis* com outras espécies em Sistemas Agroflorestais pode contribuir para recuperação de áreas degradadas, reduzir o desmatamento em florestas primárias e oportunizar o desenvolvimento sustentável (IPEF, 2019).

No Pará, de acordo com Maneschy (2009) e Rocha et al. (2015), a espécie estudada é, comumente, plantada em monocultivos ou associada a outras espécies arbóreas para compor sistemas silvipastoris. Há alguns estudos na literatura que apontam o bom desempenho da *T. grandis* ao compor estes sistemas, tal como, Azevedo et al. (2012) e Silva et al. (2017). Estes autores afirmam ainda que a adoção deste sistema deve ser priorizada nesta região, visto as amplas áreas degradadas pela pastagem. Enfatiza-se que a espécie supracitada é adaptável às diferentes zonas ecológicas e possui elevado desempenho. Portanto, recomenda-se sua utilização para compor áreas desertas e desmatadas, que se deseja recuperar (WAHONOU et al., 2017; SILVA et al., 2017).

Entretanto, de acordo com Santos et al. (2020), tem-se escassez de informações para fundamentar o manejo de povoamentos de *T. grandis* na Amazônia oriental, parte da Amazônia Legal que pertence ao referido estado. Isto ocorre, pois a ampliação de plantios de *T. grandis* nesta região é recente (SANTOS et al., 2020).

### **3.2. Altura**

A tomada de decisões no âmbito florestal é fundamentada na medição e estimação estoque florestal (SILVA; LOPES, 1984; MEUNIER et al., 2001; SOARES et al., 2012; SANQUETTA et al., 2014). Entretanto, para que isso ocorra é necessário dispor de determinadas características do povoamento, tal como, a altura das árvores (LEITE e ANDRADE, 2003; BINOTI et al., 2013; CAMPOS; LEITE, 2017). Em conformidade com Machado e Figueiredo Filho (2006), a altura da árvore é caracterizada como a distância linear por toda extensão longitudinal da árvore, seguindo de sua base até o ponto de interesse.

Exemplificando a importância de se conhecer as alturas das árvores, ressalta-se que esta variável é, comumente, utilizada para presumir o volume, classificar o sítio, avaliar o incremento do volume e da altura (MEUNIER et al., 2001; FERREIRA et al., 2011; SOARES et al., 2012; CAMPOS; LEITE, 2017). Quando usada como variável independente, a altura constitui também funções de afilamento de árvores individuais e relações de dendrometria (CHICHORRO et al., 2003; SOUZA, 2007; SOUZA et al., 2008; ARAUJO, 2015; CAMPOS; LEITE, 2017).

No que diz respeito ao desenvolvimento das florestas, a altura média das dominantes, frequentemente, dada pela média da altura das 100 árvores de maior diâmetro por hectare (ASSMANN, 1961; FINGER, 1992; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006), associada à idade do plantio, expressa o índice de sítio, sendo este capaz de avaliar e indicar a produtividade local (SELLE et al., 1994; MACHADO et al., 1997; SELLE et al., 2008; CONCEIÇÃO et al., 2016; KESS et al., 2016; DOBNER et al., 2017).

Para a realização de estudos embasado nesta variável, é primordial especificar qual altura está sendo usada (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). As medições da altura são variáveis, pois depende do mercado, da região e do produto a ser confeccionado. Em medições florestais utiliza-se, regularmente, a altura total, a altura do fuste, a altura comercial e a altura da copa. (FINGER, 199; SOARES et al., 2011)

A altura total corresponde à distância do solo até o ápice da árvore. Para realizar esta mensuração é necessário visualizar, do mesmo ponto, a base e o topo do indivíduo (FINGER et al., 1992; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). Devido aos elevados custos e os erros associados, esta

medição é raramente realizada em florestas naturais e, ou, densas (SILVA et al., 2012; BINOTI et al., 2013; CURTO et al., 2013; MELO et al., 2017).

A altura do fuste, por sua vez, é a distância linear da base até o ponto de inserção da copa (FINGER, 199; SOARES et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). A altura da copa, ou seja, o comprimento da copa é a diferença entre altura total e altura do fuste (FINGER et al, 1992; SOARES et al, 2011; MARTINS, 2015).

A altura comercial, frequentemente empregada, é o comprimento do fuste desde a base até determinado ponto onde se tem o diâmetro mínimo requerido ou onde há algum defeito que impossibilita a obtenção do produto (FINGER et al., 1992; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). Logo, esta altura é variável, pois depende do mercado, da região e do produto a ser confeccionado (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011).

Para aferir a altura de uma árvore, podem-se fazer medições diretas. Estas mensurações são realizadas em árvores derrubadas ou em pé. Em troncos tombados usam-se, majoritariamente, trenas, sendo possível medir o comprimento total e parcial (FINGER et al., 1992; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011). As medidas em árvores em pé ocorrem quando estas são baixas e, ou, estão localizadas em áreas abertas (MENDONÇA et al., 2011; BINOTI et al., 2013). Esta ação pode ser feita com varas ou hastes encaixáveis (FINGER et al, 1992; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011).

As mensurações indiretas, por sua vez, são feitas com aparelhos hipsômetros (FINGER et al., 1992; MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011; 2014; SANQUETTA et al., 2014; CAMPOS; LEITE, 2017). A construção destes instrumentos baseia-se no princípio geométrico, o qual relaciona a variável de interesse com o lado de triângulos similares, ou no princípio trigonométrico, que confronta os ângulos e as distâncias (SOARES et al., 2011; JESUS et al., 2012; SILVA et al., 2012; FELICIANO et al., 2016). Infere-se, apoiado nos inúmeros instrumentos criados com esta finalidade, a ineficiência destes em determinada característica desejável, cita-se como estes aspectos a facilidade em manuseio, as despesas, a exatidão e a longevidade do aparelho (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006).

Por tratar-se de uma atividade onerosa e demorada, há ainda estudiosos que buscam dispor da altura por meio da estimação (MENDONÇA et al, 2011; MOREIRA et al.,

2015; KOHLER et al., 2017). Ao mensurar algumas árvores e estimar a altura das restantes, tem-se maior rapidez na coleta de dados, facilidade no processamento das informações, precisão e redução dos custos do inventário florestal (OLIVEIRA et al., 2011; ANDRADE et al., 2015; MACHADO et al., 2019).

A presunção da altura é feita a partir da relação com outras variáveis, frequentemente, de fácil obtenção, como o diâmetro (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006; SOARES et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2017). Utilizam-se, neste caso, o ajuste de modelos genéricos e, ou, treinamento de redes neurais artificiais (CAMPOS et al., 2017; NOGUEIRA, 2017; NETO et al., 2018; MENDONÇA et al., 2018; BUENO et al., 2020; COSTA-FILHO et al., 2020).

### **3.3. Modelos genéricos**

Com intuito de presumir a altura das árvores, empregam-se modelos hipsométricos tradicional e genérico (BARROS, 2002, SOARES et al., 2004; FILHO et al., 2010; MENDONÇA et al., 2015; MENDONÇA et al., 2018). Contrário às equações tradicionais, que utilizam a relação entre diâmetro a 1,30 m do solo (dap) e altura, os modelos genéricos relacionam à altura também outras variáveis facilmente mensuradas no povoamento florestal (CARDOSO, 1989; SCOLFORO, 1993; BARROS, 2002;). Refere-se como parâmetros usados, comumente, para compor este modelo: a idade, o diâmetro, a densidade do povoamento e o índice de sítio (CARDOSO, 1989; BARROS, 2002; BARTOSZECK et al., 2004; FILHO et al., 2010).

Baseado no que foi posto, os modelos genéricos sobressaem sobre os modelos tradicionais, pois carecem apenas de um ajuste para contemplar a diversidade de características do povoamento (SOARES, 2004; FILHO et al., 2010; RIBEIRO, 2010; MENDONÇA et al., 2015; MENDONÇA et al., 2018). Aponta-se ainda como vantagem desta equação o uso de dados de diferentes espaços temporais, de tal maneira que permita ainda visualizar a curva de evolução da altura no decorrer do tempo (FILHO et al., 2010).

Em virtude da aplicabilidade destes modelos foram desenvolvidas algumas metodologias neste âmbito (CARDOSO, 1989).

Schmidt (1977), para definir indiretamente a relação hipsométrica, pesquisou a relação entre os betas e os parâmetros do povoamento, gerando uma regressão múltipla para cada coeficiente. Posteriormente, as equações obtidas foram substituídas no

modelo selecionado previamente. Na metodologia desenvolvida por Wendling (1978), utiliza-se a correlação entre os coeficientes do modelo selecionado e os parâmetros do povoamento. Este autor notou ainda que os parâmetros ao quadrado representam melhor a variável estudada. West (1982), por sua vez, escolheu primeiramente o modelo a ser utilizado e, posteriormente, associou as variáveis do povoamento aos parâmetros da equação selecionada. Em um estudo realizado por Cardoso (1989) foram apontadas ainda algumas outras metodologias desenvolvidas nesta esfera.

Na literatura, foram encontrados diversos estudos que buscaram comparar modelos tradicionais e genéricos, tais como, Bartoszeck et al. (2002), Bartoszeck et al. (2004), Soares et al. (2014) Filho et al. (2010), Mendonça et al. (2015), Mendonça et al. (2018), Santos e Andrade (2020).

### **3.4. Redes Neurais Artificiais**

As redes neurais artificiais correspondem a modelos computacionais elaborados a partir da observação dos sistemas nervosos dos seres vivos (HAYKIN, 2001; MAEDA et al., 2009; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014; NADIKATTU, 2017; TOSUN; DINCER, 2017; GUPTA; RAZA, 2019). Este método tem a competência de categorizar padrões, esquematizar sistemas não lineares baseado no entendimento sobre o comportamento dos processos envolvidos, descritos pelas informações cedidas, sejam elas medidas, amostradas e, ou, padrões (HAYKIN, 2001; BRAGA et al., 2014; TOSUN; DINCER, 2017).

O neurônio biológico, o qual se baseia este processo, tem como intuito transmitir impulsos sob dadas condições operacionais (CERQUEIRA et al., 2001; HAYKIN, 2001; MAEDA et al., 2009; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014). Para isso dispõem-se de dendritos, constituintes capazes de interceptar estímulos do meio externo ou de outros neurônios; de axônios, responsáveis por conduzirem os impulsos mencionados, por meio da sinapse, a qual realiza a transferência, e, por fim, de corpo celular, encarregado de processar as informações obtidas (RUFFIER et al., 1998; HAYKIN, 2001; FERNEDA, 2006).

O neurônio artificial, por sua vez, concede saídas normalmente contínuas e executa funções simplórias (HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010; MONJEZI ET AL., 2010; BRAGA et al., 2014). Para isso é constituído, de maneira simplificada, por camadas de entrada, que se assemelha aos estímulos retidos pelos dendritos; geralmente,

por pesos sinápticos, que atribui determinadas relevâncias as entradas, e por saídas que dizem respeito aos resultados produzidos (CERQUEIRA et al., 2001; MELO et al., 2006; ROCHA et al., 2013). Contrário ao sistema nervoso dos seres vivos, as redes neurais artificiais realizam apenas processamento sequencial (CERQUEIRA et al., 2001; HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014).

Tem-se como características principais da RNA o ajuste dos pesos sinápticos em conformidade com a apresentação sucessiva de exemplos associados ao padrão analisado; a capacidade de aprendizado decorrente do treinamento da rede; a organização dos dados a partir do reconhecimento e agrupamento de padrões; a aptidão de generalização das soluções após o treinamento da rede; o armazenamento distribuído, oriundo das altas interconexões, que possibilita a transigência ao erro; e a possibilidade de utilizar os resultados em outros softwares e hardwares (HAYKIN, 2001; FISZELEW, 2007; CERQUEIRA et al., 2001; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014; GUPTA; RAZA, 2019).

A topologia das redes neurais artificiais, isto é, a composição dos sistemas, é um fator determinante para sua classificação (TIERRA, 2003; SILVA et al., 2010). A escolha da estrutura da rede está interligada ao grau de dificuldade, ao conhecimento retido e a dinamicidade do processo. Consideram-se ainda as características dos dados a serem inseridos e obtidos (HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014).

A categorização das redes pode ser feita também de acordo com sua arquitetura. Esta, por sua vez, é a forma em que os variados neurônios se arranjam em relação aos demais. Estes arranjos estão ligados, especialmente, às associações sinápticas (FISZELEW, 2007; SILVA et al., 2010; GUMPTA e RAZA, 2019). Classificam-se as arquiteturas, em sua maioria, em: Redes Alimentadas Adiante com Camada Única, Redes Alimentadas Diretamente com Múltiplas Camadas e Redes Recorrentes (GARDNER e DORLING, 1998; HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014). Ressalta-se ainda que, a arquitetura da rede influencia diretamente na sequência de regras e nos raciocínios empregados em seus treinamentos (HAYKIN, 2001; MAEDA, 2009).

As Redes Alimentadas Diretamente com Múltiplas Camadas são compostas por uma ou mais camadas ocultas, denominada também camada intermediária (GARDNER e DORLING, 1998; HAYKIN, 2001; AUER et al., 2008; SILVA et al., 2010; BRAGA et

al., 2014). A incorporação desta camada transpassa as soluções locais e se torna global, isto ocorre em virtude da extração de estatísticas relevantes, aumento das conexões sinápticas e interações entre os neurônios. Constata-se que camada oculta tem como intuito intervir entre as camadas de entrada e saída (HAYKIN, 2001). Enfatiza-se, no entanto, que os números de neurônios presentes nas camadas intermediárias, relacionados a complexidade do problema estudado, não se igualam aos números de sinais presentes na camada de entrada. Aponta-se como tipos de rede desta arquitetura o *multilayer Perceptron* (MLP) e *radial basis function* (RBF) (HAYKIN, 2001; SILVA et al., 2010; BRAGA et al., 2014).

Esta arquitetura é amplamente utilizada no âmbito florestal, nas mais diversas áreas. Dentre das aplicabilidades presentes na literatura, cita-se a estimativa da altura de mudas (FERREIRA, 2014), a presunção volume total e individual (BHERING et al., 2015; SILVA, 2015; ABREU et al., 2017), a previsão da diversidade e equalidade florestal (CABACINHA; LAFETÁ, 2017), a prognose de crescimento (CASTRO et al., 2003; SILVA, 2019), a classificação de sítio florestal (CONSENZA et al., 2017), a distinção de espécies por meio da anatomia da madeira (ESTEBAN et al., 2017) e a previsão da irradiação (BASSETTO et al., 2018). Similar a esta pesquisa, cita-se alguns estudos encontrados, tais como, Vendruscolo et al. (2015), Binoti (2016) e Campos et al. (2017).

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Área de estudo e caracterização dos povoaamentos

O estudo foi conduzido em povoaamentos clonais de *T. grandis* na Fazenda São Luiz, pertencente à empresa Tietê Agrícola Ltda, localizada no município de Capitão Poço, Pará (Figura 3).

#### Localização da área de estudo situada no município Capitão Poço, Pará

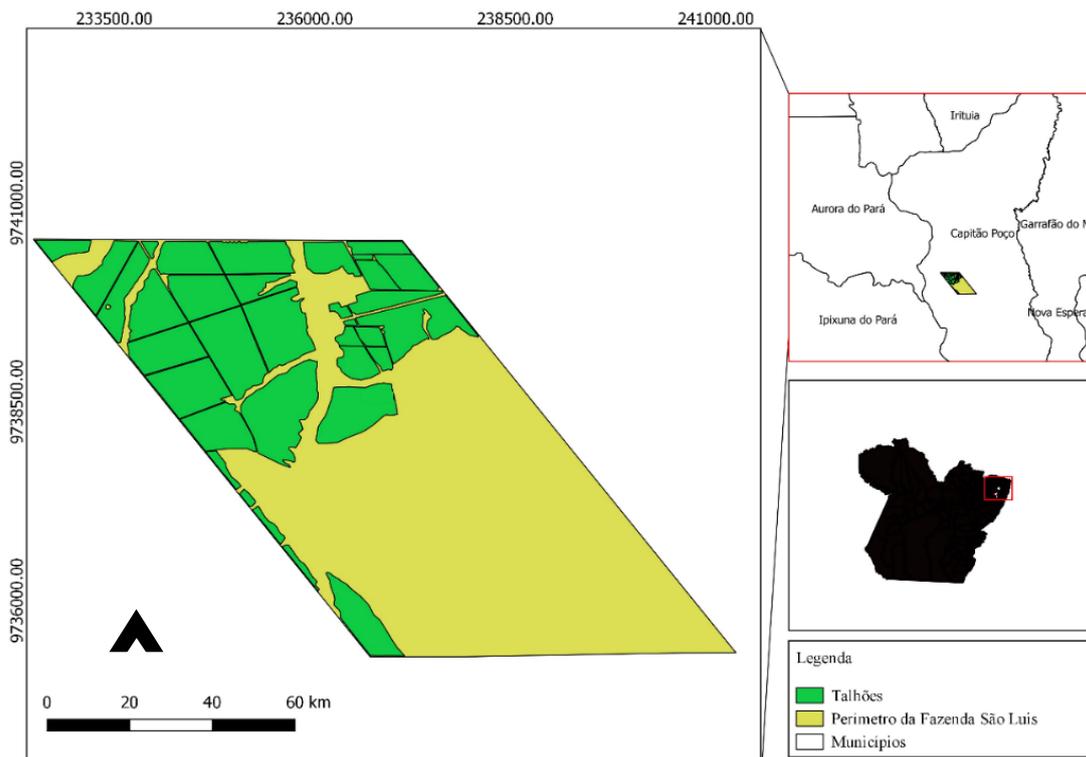


Figura 3: Área de estudo situada no município Capitão Poço, Pará.

Está situada na região de Floresta Ombrófila Densa e, ou, Floresta Ombrófila Tropical, constituinte ainda da sub-região dos altos platôs Pará-Maranhão (IBGE, 2012). Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, a região possui, majoritariamente, Plintossolo Pétrico concrecionário (FFc), Latossolo Amarelo distrófico petroplântico (LAd) e típico (LAdt) (OLIVEIRA, 2013). Quanto ao relevo, caracteriza-o, predominantemente, com suave ondulação. Por fim, afirma-se que, conforme a classificação de Köppen, a região possui clima tropical úmido ou subúmido (Am), transitório entre os tipos climáticos Af e Aw. Este clima possui temperaturas médias mensais superiores a 18°C em meses frios, estação seca reduzida e atenuada pelos elevados níveis de precipitação (ALVARES et al., 2013).

A área plantada total engloba 883 ha, distribuí-se em 26 talhões com povoamentos de diferentes idades (4, 5, 6, 7, 9 anos) e espaçamentos (3,5 x 3,5 m, 3,75 x 3,75 m, 4 x 4 m).

Realizou-se o desbaste sistemático e, ou, seletivo, com intensidade de 50% da remoção da área basal, aos cinco e nove anos do plantio. Com relação as demais práticas silviculturais realizadas em todas as áreas, cita-se o combate às formigas cortadeiras com iscas formicidas, limpeza de área com trator de esteira, calagem com calcário dolomítico (3 t/ha), plantio manual, adubação de plantio (200 g/planta de NPK 8-28-16 e 100 g/planta de KCl), controle de plantas invasoras por meio de coroamento com enxada, roçagem mecanizada e semi-mecanizada com trator hidráulico, adubação de manutenção com aplicação de Boro (7 g/planta) e KCl (100 g/planta) e desrama artificial com serra e motopoda.

#### **4.2. Coleta de dados**

O inventário florestal contínuo foi realizado em 31 parcelas fixas circulares com raio de 12,61 metros (500 m<sup>2</sup>). Evidencia-se que as parcelas circulares possuem baixa porcentagem de bordadura, com isto tem-se uma redução nos erros não amostrados, pois não há inclusão ou exclusão errônea de indivíduos na borda. Aponta-se ainda como vantagem desta parcela, a facilidade em sinalizar os centros das unidades amostrais. Entretanto, tem-se dificuldade em limitar a unidade amostral, contrário a parcelas quadradas e retangulares (MACHADO; FIGUEIREDO, 2009).

O processo de amostragem utilizado foi sistemático, onde se aplicou grades de 320 m x 320 m em todo plantio. Mediu-se neste processo a altura total e o diâmetro medido à 1,30 m do solo, com auxílio do hipsômetro Vertex e fita diamétrica, respectivamente. Evidencia-se que, no momento da coleta de dados, cerca de 60% da área dos povoamentos florestais analisados haviam sido desbastados (SANTOS et al., 2019).

#### **4.3. Variáveis independentes**

Com intuito de obter um modelo representativo, selecionaram-se algumas variáveis independentes que poderiam, ao constituir modelos genéricos e as redes neurais artificiais, serem capazes de expressar o crescimento vertical da árvore. Isto é, espera-se que as variáveis independentes possuam alta correlação com a variável de interesse, objetivando dispor de estimativas melhores e alturas totais estimadas mais precisas.

Nesse sentido, optou-se pelo dap, pois, de acordo com Husch et al. (1982), esta variável expressa a posição sociológica da árvore no povoamento, fator influente no crescimento vertical da árvore. Em virtude da associação com a produtividade e a densidade do horto florestal, fatores atuantes na altura do indivíduo, optou-se por utilizar também o diâmetro médio quadrático (dg), obtida conforme a equação 1. Por fim, foi selecionado ainda a idade (I) do povoamento para que possa dispor de apenas um modelo para representar a altura das árvores em diferentes espaços temporais (FILHO et al., 2010).

$$Dg = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n DAP_i^2}{n}} \quad (1)$$

Onde: dg = diâmetro médio quadrático, dap<sub>i</sub> = diâmetro a 1,30 m do solo da i-ésima árvore, n = número total de árvores.

Para verificar o grau de associação entre a altura e as variáveis dap, dg e idade na constituição dos modelos genéricos, empregou-se a correlação de Pearson, por meio do *software* de gerenciamento de dados *Microsoft Excel 16*. Esta mensuração é feita por meio de dados amostrais pareados (TRIOLA, 2013).

Além da correlação entre a variável dependente e as variáveis independentes, foi analisado a dependência entre os regressores. Para que houvesse esta verificação, mensurou os fatores de inflação da variância (VIF) por meio do *software Action Stat* (PORTAL ACTION, s/d).

#### **4.4. Modelagem da altura total usando regressão**

Para estimar a altura total (ht) das árvores, foram elaborados e selecionados para ajuste quatro modelos genéricos, sendo um linear e três não lineares (Tabela 1). A regressão foi feita pelo *software Statistica 13.5*, empregando o método dos mínimos quadrados ordinários.

Tabela 1: Modelos hipsométricos ajustados para a estimativa da variável altura total.

Modelo	Categoria	Número
$ht = \beta_0 + \beta_1 \times dap + \beta_2 \times dg + \beta_3 \times i$	Linear	1
$ht = \beta_0 \times dap * \beta_1 \times dg * \beta_2 \times i * \beta_3$	Não linear	2
$ht = \beta_0 \times \left(\frac{dap}{i}\right) \beta_1 \times dg * \beta_2$	Não linear	3
$ht = \beta_0 \times \left(\frac{i}{dg}\right) \beta_1 \times dap * \beta_2$	Não linear	4

Onde: ht=altura total da árvore (m); dap=diâmetro a 1,30 m do solo (cm); i=idade (anos); dg=diâmetro médio quadrático (cm<sup>2</sup>);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$ = coeficientes a serem obtidos.

Para o ajuste dos modelos genéricos usou-se ainda 70% dos dados (n = 617), os quais foram selecionados aleatoriamente dentro das classes de diâmetro, por meio do software *Microsoft Excel 16*. Evidencia-se que as classes diamétricas foram estabelecidas com amplitude de dois centímetros. O restante da base de dados foi utilizado para validação dos modelos genéricos.

#### 4.5. Modelagem da altura total usando redes neurais artificiais

Para obter redes neurais capazes de presumir a altura das demais árvores do povoamento, usou-se também o software *Statistica 13.5*. Para isso, a camada de saída das redes foi constituída pela altura, a entrada, por sua vez, foi formada pelo dap, dg, i. Em virtude da associação com dap, o dg foi utilizado apenas em um dos testes para que se possa verificar sua relevância em compor as RNA's. Evidencia-se ainda que a idade foi empregada como variável categórica e as demais como variáveis contínuas.

Ao trabalhar com redes neurais artificiais é imprescindível alocar uma porcentagem significativa dos dados para o treinamento, buscando englobar toda a variabilidade das variáveis (CONSENZA et al., 2017). Em virtude disso, nesta pesquisa, destinou-se 70% dos dados (n = 617) para o treinamento, sendo restante designado para a validação das redes. Aponta-se que os dados utilizados neste treinamento foram os mesmos usados para o ajuste dos modelos.

O algoritmo quase-Newton desenvolvido por Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) foi utilizado para processar as redes neurais Intelligence Prover Solver (IPS),

presente no *Statistica 13.5*, que possui grande poder de resolução para problemas de otimização e previsões (GUERROUT et al., 2018).

Ressalta-se ainda que o treinamento excessivo das redes, que as torna específicas para o conjunto de dados treinado, reduz sua aplicabilidade e generalização efetiva (Haykin, 2001). Afirmam ainda que este erro, denominado overfitting, pode ocorrer quando há ainda um número exagerado de neurônios (HAYKIN, 2001; FISZELEW, 2007; BRAGA, CARVALHO; LUDERMIR, 2014; CAMPOS; LEITE, 2017; GUPTA; RAZA, 2019). Por outro lado, a falta de treinamento e o número reduzido de neurônios, processo chamado de underfitting, faz com que a rede seja incapaz de encontrar relação entre as variáveis, a tornando-a inútil (HAYKIN, 2001; BRAGA, CARVALHO; LUDERMIR, 2014; CAMPOS; LEITE, 2017; GUPTA; RAZA, 2019).

Mediante ao exposto, usou-se, neste estudo, o número total de ciclos ou o erro quadrático médio, ambos otimizados pelo IPS, visando evitar problemas de perda de poder de generalização da rede causado pelo número exagerado de ciclos (overfitting) ou de desempenho inferior em razão do pequeno número de ciclos (underfitting) (SHIBLEE et al., 2010; MIGUEL et al., 2018).

Ainda a fim de eliminar estes erros, treinou-se redes, do tipo MLP, com 3 a 10 neurônios. Das demais configurações empregadas por esta pesquisa para a aquisição das redes neurais, cita-se o uso, associadas à camada oculta e de saída, de funções de ativação logística, exponencial, hiperbólica tangente (tahn) e de identidade.

#### 4.6. Análise de dados

Com o propósito de investigar a existência de regressão entre as variáveis realizou-se a análise de significância do teste F ( $p < 0,05$ ), a uma probabilidade de 95%. A análise de precisão e comparação dos modelos e das redes foi feita por meio do erro padrão residual absoluto e percentual da estimativa ( $S_{yx}$  e  $S_{yx} \%$ ) (2 e 3); do coeficiente de correlação ( $r$ ); da análise gráfica dos resíduos, da análise dos valores observados e preditos e distribuição do erro (Draper; Smith, 1997) .

$$S_{yxr} \% = \sqrt{\frac{\sum(H-Hest.)^2}{n-p-1}} \cdot \frac{100}{H_{real}} \quad (2)$$

$$Syx\% = \frac{Syx}{H} * 100 \quad (3)$$

Onde:  $H$  = altura observada (m);  $H_{est}$  = altura estimada (m);  $\bar{H}$  = altura média observada (m);  $n$  = tamanho amostral;  $p$  = número de variáveis do modelo.

Para verificar diferença significativa entre os valores estimados pelo modelo e pela RNA selecionada, com altura medida em campo (testemunha), realizou-se a análise da variância (ANOVA) mediante o delineamento inteiramente casualizado (DIC).

Ao final da análise, com intuito de verificar o comportamento dos valores estimados pelos métodos selecionados, calculou-se a diferença agregada (DA). Sendo DA a diferença entre o somatório dos valores observados e estimados.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Estatística descritiva

No processo de inventário, foram mensuradas pares de diâmetro e altura de 882 árvores. Os dados de altura das árvores apresentaram uma dispersão em relação à média, ou seja, variância da amostra, de 4,08 (m)<sup>2</sup> e o desvio-padrão de 2,02 m, com coeficiente de variação (CV%) de 13.32%. A variável  $d_{ap}$  apresentou variância e desvio-padrão de, respectivamente, 16,19 (cm)<sup>2</sup> e 4,02 cm. O diâmetro médio quadrático, mensurado por parcela, expressou variância de 13,45 (cm)<sup>2</sup>, desvio-padrão de 3,67 cm e coeficiente de variação 17,34% em torno da média, neste caso, de 21,16 cm (Tabela 2).

Tabela 2: Estatística descritiva dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

Variáveis	Mínimo	Média	Máximo	CV
ht	8,70	15,16	20,20	13,32
dap	10,03	21,09	34,57	19,08
dg	14,39	21,16	31,81	17,34
I	4,00	6,11	9,00	22,16

Onde: ht = altura total da árvore (m);  $d_{ap}$  = diâmetro a 1,30 m do solo (cm); dg = diâmetro médio quadrático por parcela; I = idade (anos); CV = coeficiente de variação (%).

### 5.2. Correlação e multicolinearidade

De acordo com Hinkle et al. (2003), caracteriza-se uma relação baixa quando a correlação de Pearson se encontra 0,30 a 0,49, moderada, 0,50 e 0,69, e alta quando há valores superiores a 0,7.

Portanto, por apresentarem moderado a alto e positivo grau de associação com a variável dependente, infere-se que as variáveis independentes selecionadas para compor os modelos de regressão e as redes neurais são capazes de explicar o comportamento da altura da árvore (Tabela 3).

Tabela 3: Matriz de correlação entre as variáveis independentes (dap, dg e idade) e dependente (ht) obtidas em povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

	ht	dap	dg	I
ht	1,00			
dap	0,81*	1,00		
dg	0,79*	0,91*	1,00	
i	0,63*	0,77*	0,84*	1,00

Onde: dap = diâmetro a 1,3 m do solo (cm); dg = diâmetro médio quadrático; i = idade (anos), \* significativo para  $\alpha$  0,05.

Ao analisar a dependência entre os regressores, obtiveram-se fatores de inflação da variância (VIF) inferiores a 10. Logo, afirma-se que as variáveis independentes podem ser utilizadas conjuntamente nos modelos e redes, de modo que não ocorra sobreposição ao explicar a variável dependente. Isto é, o emprego conjunto destas variáveis não acarretará em erros na estimativa de regressão (HAIR et al., 2009), pois há ausência de multicolinearidade.

Tabela 4: Análise de multicolinearidade entre as variáveis independentes obtidas em povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

	dap	dg	Idade
VIF	5,6334	7,8545	3,3149

Onde: VIF = fator de inflação da variância; dap = diâmetro a 1,3 m do solo; dg = diâmetro médio quadrático.

### 5.3. Modelagem da altura utilizando regressão

Na Tabela 5 são apresentados os quatro modelos ajustados, bem como os respectivos indicadores de ajuste e precisão. Todas as equações foram significativas quanto ao teste F ( $p < 0,05$ ), mostrando que existe regressão.

Com relação ao erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ), qualifica-se como ajustes precisos hipsométricos aqueles que detêm erros menores que 1 metro e 10% (SCOLFORO, 2008). Entretanto, eventualmente, não é possível alcançar estes números

(MIGUEL et al., 2018). Ao ajustar os modelos propostos, encontrou-se valores próximos de  $S_{yx}$ , variando entre 1,13 e 1,18 metro (7,48 e 7,72%). Ainda que todos os modelos se mostraram eficientes para estimar a altura de *T. grandis*, menciona-se, em concordância com o critério supracitado, que a equação 2 apresentou ligeira superioridade (Tabela 5).

Ao ajustar modelos genéricos para estimar altura de árvores *Eucalyptus* sp., Ribeiro et al. (2010) encontraram valores de  $S_{yx}$  ligeiramente inferiores ao encontrados por esta pesquisa, variando entre 0,88 e 1,09 m. Miranda et al. (2017), objetivando compor modelos de mortalidade para povoamentos de *Pinus taeda* L., ajustaram modelo genéricos para estimar altura constituído por DAP, I e S (índice de sítio). Ao realizar este ajuste, os autores supracitados obtiveram valor de  $S_{yx}$  % próximo aos desta pesquisa, sendo ele de 6,7%. Filho et al. (2019), por sua vez, ao ajustarem modelos genéricos para povoamentos de *Pinus taeda*, encontram, entre as equações ajustadas, uma maior amplitude de valores de  $S_{yx}$  %, sendo estes entre 6,90 e 9,69 %.

É possível ainda, mediante o coeficiente de correlação, atestar a superioridades do modelo 2. Pois, este apresentou valor de  $r$  mais próximos a um, isto é, detém maior grau de associação entre os valores observados e estimados (Tabela 5). Coeficientes de correlação ligeiramente superiores a estes foram encontrados por Filho et al. (2019) ao ajustarem modelos genéricos para presumir a altura de *Pinus taeda*.

Tabela 5: Medidas de precisão dos modelos hipsométricos ajustados aos dados dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

Nº	Coeficiente	Erro Padrão	F	<i>r</i>	Syx	Syx %	
1	$\beta_0$	5,54	0,2750	27477,73*	0,8289	1,14	7,54
	$\beta_1$	0,24	0,0274				
	$\beta_2$	0,27	0,0373				
	$\beta_3$	-0,18	0,0701				
2	$\beta_0$	2,10	0,1440	27948,90*	0,8321	1,13	7,48
	$\beta_1$	0,32	0,0363				
	$\beta_2$	0,37	0,0512				
	$\beta_3$	-0,06	0,0290				
3	$\beta_0$	1,79	0,1153	35544,93*	0,8228	1,16	7,66
	$\beta_1$	0,16	0,0231				
	$\beta_2$	0,64	0,1826				
	$\beta_3$						
4	$\beta_0$	2,55	0,1696	34079,10*	0,8144	1,18	7,82
	$\beta_1$	-0,05	0,3020				
	$\beta_2$	0,57	0,0167				
	$\beta_3$						

Onde:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$  e  $\beta_3$  = coeficientes obtidos; Ep: erro padrão; F = F calculado ( $\alpha=0,05$ ); \* = significativo para  $\alpha = 0,05$ ; *r* = coeficiente de correlação; *S<sub>yx</sub>* = erro padrão da estimativa em metros; *S<sub>yx</sub>%* = erro padrão da estimativa percentual.

Ao analisar os gráficos de resíduo do modelo genéricos propostos, tornou-se novamente evidente a maior precisão do modelo não linear (2) ao estimar a altura de indivíduos de *T. grandis* (Anexo 1). Pois, a distribuição dos resíduos percentuais desse modelo não demonstrou tendenciosidade, ou apresentou baixa tendenciosidade, na estimativa da altura total, com amplitude de resíduo inferior a  $\pm 30\%$ , concentrados nas classes de  $\pm 10\%$  de erro e apresentando uma alta correlação ( $>0,8$ ) (Figura 4).

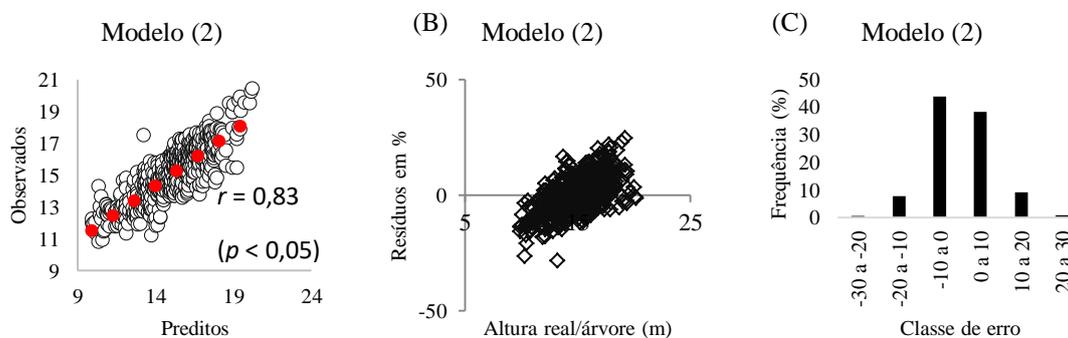


Figura 4: Representação gráfica da correlação entre alturas observadas e previstas (A), distribuição dos erros de estimativa (B) e histograma da frequência de erro relativo gerado pela equação não linear 2 (C), ajustada aos dados dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

Todavia, evidencia-se que, em termos gerais, todos os modelos do presente estudo se ajustaram a base de dados com estatísticas de ajuste e precisão próximas.

Na literatura, modelos genéricos foram registrados como adequados para estimar a altura de árvores. Como exemplo, cita-se a pesquisas desenvolvidas por Mendonça et al. (2018), o qual comprovaram a precisão, baseado em critérios estatísticos, de modelos genéricos para estimar a altura de ipê felpudos; Mendonça et al. (2015), que ao estudaram sobre estratégias e metodologias para estimar a altura de *Pinus caribaea*, concluíram, fundamentado em análise estatística, a aplicabilidade dos modelos genéricos; Santos e Andrade (2020), ao analisarem relação hipsométrica para um fragmentos de cerrado *senus stricto*, comprovam a precisão dos modelos genéricos para estimar árvores deste povoamento.

#### **5.4. Modelagem da altura utilizando RNA**

Observou-se, assim como na modelagem por regressão, ligeira variação nas estatísticas de ajuste e precisão de das RNA's. Destaca-se que as redes 6, 7, 8, 9 e 10 demonstraram baixos valores para os erros padrões da estimativa, havendo variação dos valores entre 0,88 e 1 m (5,81 e 6,62%). As demais redes obtiveram erros superiores, variando de 1,03 a 1,08 m (6,71 a 7,16%) (Tabela 6).

Baseado no coeficiente de correlação, é possível ressaltar a ligeira superioridades das redes neurais artificiais 2, 6, 7, 8, 9, 10 em relação as demais. Pois, estas apresentaram valores de  $r$  mais próximos de 1 (Tabela 6).

Resultados similares ao apresentado por esta pesquisa foram encontrados na literatura, como o de Vendruscolo et al. (2015), que avaliaram a predição da altura de árvores de eucalipto feita por meio de regressão não linear e RNA. As RNA's treinadas pelo estudo mencionado obtiveram valores de  $r$  entre 0,88 e 0,89. Cita-se também a pesquisa desenvolvida por Campos et al. (2017), onde estimou, por meio de RNA, a altura total de árvores em plantios de espécies distintas. Neste estudo encontrou-se valores de  $r$  entre 0,72 e 0,97. Filhos et al. (2019), ao treinarem RNA para presumir a altura de indivíduos de *Pinus* sp., obtiveram coeficiente de correlação de 0,942, ligeiramente superior ao desta pesquisa.

Tabela 6: Medidas de precisão das redes neurais artificiais treinadas para os dados dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

Nº	Tipo/Arquitetura	Camada de entrada	$r$	$S_{yx}$	$S_{yx}\%$
1	MLP 6-9-1		0,84	1,08	7,16
2	MLP 6-7-1		0,87	1,00	6,63
3	MLP 6-3-1	dap e i	0,86	1,03	6,85
4	MLP 6-8-1		0,86	1,02	6,74
5	MLP 6-7-1		0,86	1,01	6,71
6	MLP 7-4-1		0,87	1,00	6,63
7	MLP 7-4-1		0,89	0,93	6,16
8	MLP 7-4-1	dap, dg e i	0,89	0,94	6,23
9	MLP 7-10-1		0,90	0,88	5,81
10	MLP 7-8-1		0,90	0,88	5,82

Onde: dap = diâmetro na 1,30 m do solo (cm); dg = diâmetro médio quadrático; i = idade;  $r$  = coeficiente de correlação;  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa em metros;  $S_{yx}\%$  = erro padrão da estimativa percentual.

Na avaliação dos gráficos de resíduo da RNA's, aponta-se mais uma vez a maior precisão da rede MLP 7-10-1 ao estimar a altura de árvores de *T. grandis* (Anexo 1). Isto é, esta rede apresentou concentração de erros residuais em 30%, sendo que prevaleceram erros entre  $0 \pm 10\%$  (Figura 5).

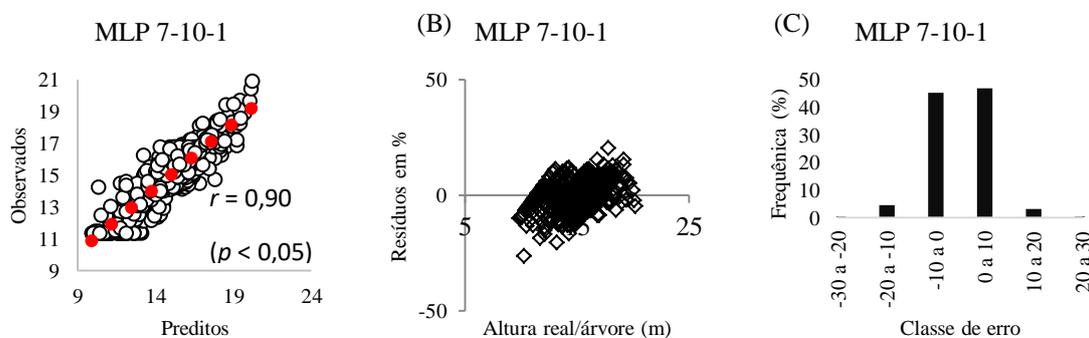


Figura 5: Representação gráfica da correlação entre alturas observadas e previstas (A), distribuição dos erros de estimativa (B) e histograma da frequência de erro relativo gerado pela rede neural artificial MLP 7-10-1 (C), ajustada aos dados dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

Baseado nos critérios apontados, a inclusão do diâmetro quadrático médio às redes neurais artificiais resulta em redes igualmente ou mais eficientes do que as demais. É possível ainda, embasado nestes resultados, caracterizar a rede 9, que apresenta estrutura descrita na figura 6, como a mais precisa.

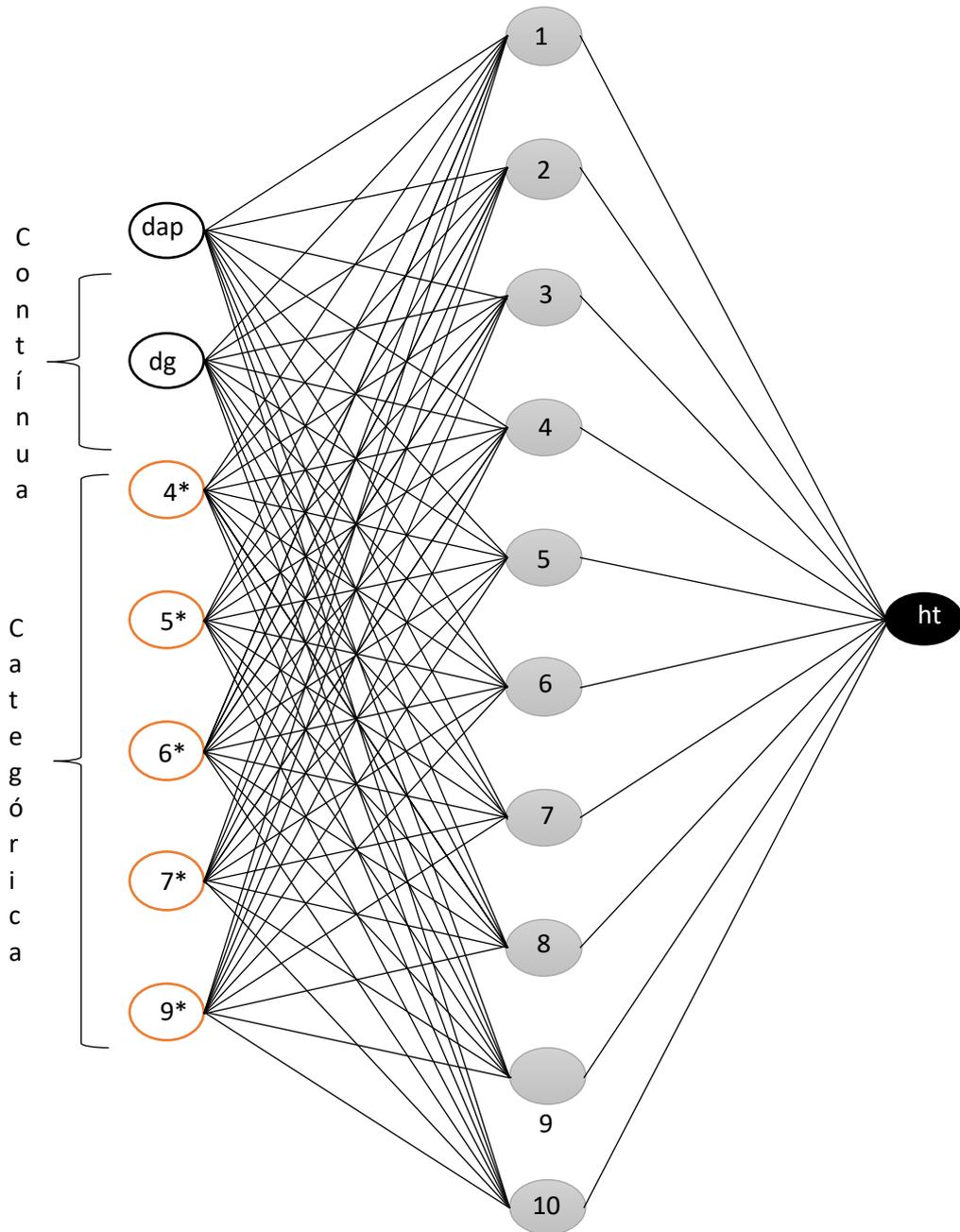


Figura 6: arquitetura da RNA selecionada e treinada aos dados dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

Onde: dap: diâmetro à 1,30 m do solo; dg: diâmetro média quadrático; ht: altura total da árvore, \* Idade em anos,

Contudo, ressalta-se que, em termos gerais, todas as redes treinadas nesta pesquisa se mostraram precisas para estimar a altura de *T. grandis*.

Na literatura, redes neurais artificiais também foram apontadas como eficientes para estimar a altura de árvores. Como exemplo, menciona as pesquisas elaboradas por Campos et al, (2017), os quais concluíram que é possível utilizar apenas uma RNA para

presumir a altura de árvores de diferentes espécies sob condições distintas de crescimento; Vendruscolo et al, (2017), onde foi comprovada, baseada em critérios estatísticos, a precisão do método mencionado para presumir altura total de *T. grandis*; Vendruscolo et al, (2016), que ao predizer a altura de *T. grandis* utilizando modelagem de efeitos mistos e RNA, concluíram que o uso de redes apresentou-se preciso e superior ao outro método.

### **5.5. Comparação entre as regressões e as RNA's**

Embasado no erro padrão das estimativas obtidas, destaca-se a superioridades das redes neurais artificiais ao presumir a altura das árvores de *T. grandis* quando comparada a modelagem por regressão (Tabela 5 e 6).

Entretanto, para completar esta comparação, fez-se necessário analisar estes métodos graficamente, pois, por meio desta avaliação é possível constatar a precisão dos métodos empregados, bem como visualizar a tendência destes em superestimar e, ou, subestimar a altura.

Ao analisar os gráficos de distribuição dos erros da estimativa percentuais notou-se, nos modelos de regressão e nas redes neurais artificiais, uma ligeira tendência a superestimar a altura de árvores (Anexo 1). Esta característica torna-se ainda mais explícita ao analisar a diferença agregada entre a equação e a rede selecionada. Pois, a diferença agregada apresentou valores negativos para rede neural artificial selecionada (-0,98), bem como para o modelo selecionado (-3,68). Dado estes valores, fica evidente, novamente, uma ligeira superioridade da rede em relação ao modelo.

Na literatura, alguns estudos apresentaram ligeira ou inexistente tendência destes métodos em superestimar a altura. Como exemplo, cita-se Santos et al, (2016), os quais observaram superestimação das alturas de árvores do Cerrado previstas por modelos genéricos; Almeida et al. (2015), que ao estimarem altura de *Araucaria angustifolia*, concluiu que não há tendência aparente de superestimar a altura estimada por RNA; Binoti et al. (2013), os quais verificaram baixa ou inexistente tendência das RNA superestimar as alturas de *Eucalyptus* sp.

Com relação ao gráfico de distribuição dos erros da estimativa, ressalta-se, a boa dispersão residual de todos os modelos ajustados e RNA's treinadas, que se situou, majoritariamente, na faixa de  $\pm 30\%$  (Figura 4).

Fundamentado no histograma da frequência de erro relativo foi possível apontar novamente uma pequena superioridade das redes neurais, sobretudo, as que englobam o diâmetro médio quadrático, em comparação a modelagem por regressão. Ainda que os modelos de regressão, assim como as RNA's, demonstrem resultados satisfatórios, havendo a maior frequência de erros em classes de 0 e  $\pm 10\%$ . Isso se deu, pois, as redes, em especial, a 6, 7, 8, 9 e 10, apresentaram uma menor quantidade de erros nas outras classes. Menciona-se que ambos os métodos apresentaram tendência de distribuição normal, Resultados similares a este foram encontrados em outros estudos, tais como, em Campos et al. (2013) e Vendruscolo (2015).

Aponta-se ainda que as redes neurais artificiais não necessitam de pré-tratamento dos dados, isto é, realização de operações matemáticas, e, definição manual e, ou, prévia de sua arquitetura, tal como foi feito com os modelos genéricos. Dessa forma, as RNA's apresentam ligeira vantagem operacional em comparação com os modelos genéricos.

Mesmo que as RNA's apresentem indicadores estatísticos superiores aos apresentados pelos modelos de regressão, evidencia-se, que a RNA e o modelo selecionado não possuem diferença significativa entre eles e entre os valores observados. Esta afirmação é embasada na inferioridade do valor de F calculado (0,13), ao nível de significância de 5%, em relação ao valor de F tabelado (3,85), obtido por meio da análise de variância (Tabela 7). Por conseguinte, afirma-se que as duas técnicas utilizadas são capazes de estimar com precisão a altura de árvores de *Tectona grandis*.

Tabela 7: análise da variância (ANOVA) aplicada sobre a alturas reais e estimadas pelo modelo de regressão e rede neural artificial selecionados.

	GL	SQ	QM	Fcal
Tratamento	2	13,30	6,65	0,13
Resíduo	2643	135461,51	51,25	Ftab
Total	2645	135474,82		3,85

Onde: GL = grau de liberdade; SQ = soma dos quadrados; QM = quadrado médio; Fcal = F calculado; Ftab = F tabelado;  $p > 0,05$ .

Na literatura, as redes neurais artificiais e os modelos genéricos se mostraram precisos para estimar a altura das árvores e apresentaram pequena discrepância entre os

critérios estatísticos, Cita-se como exemplo destes estudos, as pesquisas desenvolvidas por Mendonça et al. (2018), onde foi observado superioridade do modelo Amateis em comparação às RNA's para estimar a altura total de ipês felpudo, ainda que ambos apresentaram-se precisos; Barreiros et al. (2019), onde ao estimar a altura de *Eucalyptus* sp., verificou-se a precisão de modelos genéricos e RNA's, ainda que a rede tenha apresentado valores estatísticos superiores,

Ressalta-se também que ao utilizar modelos genéricos e, ou, redes neurais artificiais para estimar a altura das árvores que não foram mensuradas no processo de amostragem, ao invés de medi-las em campo, tem-se uma redução de custos do inventário florestal, bem como, aumento da precisão, facilidade no processamento dos dados e diminuição do tempo de coleta (OLIVEIRA et al., 2011; ANDRADE et al., 2015; MACHADO et al., 2019).

Em virtude das características mencionada, as alturas estimadas pelos métodos analisados podem ser utilizadas para compor modelos volumétricos e funções de afilamento do fuste, classificar sítio florestal, verificar o acréscimo da altura e do volume do indivíduo e, conseqüentemente, do povoamento (CHICHORRO et al., 2003; SOUZA, 2007; SOUZA et al., 2008; ARAUJO, 2015; CAMPOS; LEITE, 2017). Portanto, embasar a tomada de decisão do âmbito florestal.

## 6. CONCLUSÃO

As variáveis independentes dap, dg e idade são capazes de descrever o comportamento da altura dos indivíduos do povoamento de *Tectona grandis* analisado.

Na modelagem por regressão, o modelo linear foi superior à dois modelos não lineares ao predizerem a altura. Este modelo apresentou ligeiramente inferior ao modelo genérico selecionado.

Afirma-se que os dois métodos avaliados, modelos genéricos e redes neurais artificiais, são eficientes para estimar a altura de árvores de *T. grandis*. Ainda que não haja diferença significativa, as redes neurais artificiais, especialmente as que englobaram dg, apresentaram indicadores estatísticos superiores em relação à regressão.

Em virtude também das facilidades operacionais apresentadas pelas redes neurais artificiais, apesar de não haver distinção estatística, recomenda-se o uso deste método, ao invés dos modelos genéricos, para estimar a altura de árvores em povoamentos florestais.

Por fim, reitera-se que as metodologias analisadas podem ser utilizadas para estimar a altura das árvores, para que estas componham funções de afilamento, equações volumétricas, índices de sitio e, ou, avaliação de incremento das variáveis dos povoamentos florestal. Portanto, o uso desta metodologia contribuirá para a tomada de decisão no âmbito florestal.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAF. Anuário estatístico ABRAF 2013: ano base 2012. **Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas**. Brasília, 2013. Disponível em: <<https://www.ipef.br/estatisticas/relatorios/anuario-ABRAF13-BR.pdf>>. Acesso em 13 dez. 2019.
- ABREU, J. C. et al.. Assessing alternatives to estimate the stem volume of a seasonal semi-deciduous forest. **Floresta**, Curitiba – PR, v. 47, n. 4, p. 375-382, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/54259/34973>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- ALMEIDA, T. G. et al.. Redes Neurais Artificiais para estimativa de altura em povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **5º Congresso Florestal Paranaense**, Curitiba, oct. 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/283017475\\_Redets\\_neurais\\_artificiais\\_para\\_estimativa\\_de\\_altura\\_em\\_povoamentos\\_de\\_Araucaria\\_angustifolia](https://www.researchgate.net/publication/283017475_Redets_neurais_artificiais_para_estimativa_de_altura_em_povoamentos_de_Araucaria_angustifolia)>. Acesso em: 28 out. 2020.
- ALVARES, C. A. et al.. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. Disponível em: <[https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen\\_s\\_climate\\_classification\\_map\\_for\\_Brazil](https://www.schweizerbart.de/papers/metz/detail/22/82078/Koppen_s_climate_classification_map_for_Brazil)>. Acesso em: 13 dez. 2019.
- ARAÚJO, B. H. P.. **Modelagem da altura, volume e afilamento do fuste de *Calycophyllum spruceanum* Benth. empregando regressão e redes neurais artificiais**. Dissertação (Mestrado) – Curso Ciências de Florestal Tropicais. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, p. 53, 2015.
- ASSMANN, E.. The principles of forest yield study. **New York: Pergamon Press**, p. 506, 1961.
- AUER, P. et al.. A learning rule for very simple universal approximators consisting of a single layer of perceptrons. **Neural Networks**, v. 21, p. 786-795, 2008. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/bcg/article/view/15507/10358>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- AZEVEDO, C. M. B. C. et al.. Crescimento da teca (*Tectona grandis* L. f) e produção de milho em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta na Amazônia Oriental. **Embrapa Amazônica Oriental**, p 1-5, 2012. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/950219/crescimento-da-teca-tectona-grandis-lf-e-producao-de-milho-em-sistema-de-integracao-lavoura-pecuaria-floresta-na-amazonia-oriental>>. Acesso em 20 out. 2020.
- BARREIROS, A. L. et al.. Estimativa da altura de árvores por meio de equações hipsométricas e por redes neurais artificiais. **VII Seminário de Iniciação Científica IFMG**, Ribeirão das Neves, 2019. Disponível em: <<https://trabalhossic.ifmg.edu.br/index.php/SIC/2019/paper/view/604>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- BARROS, D. A. et al.. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 45, p. 3-28, dez. 2020. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1747>>. Acesso em: 26 out. 2020.

- BARTOSZECK, A. C. P. S. et al.. Dinâmica da relação hipsométrica em função da idade, do sítio e da densidade inicial de povoamentos de bracatinga da região metropolitana de Curitiba, PR. Sociedade de Investigações Florestais. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 28, n. 4, p 517-533, 2004. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rarv/v28n4/22601.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- BARTOSZECK, A. C. P. S. et al.. Modelagem da relação hipsométrica para Bracatingais de região metropolitana de Curitiba – PR. **Revista Floresta**, v. 32, n. 2, 2002. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/2285>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- BASSETTO, E. L. et al.. Rede perceptron multicamadas (MLP) na estimativa da fração da irradiação solar difusa na partição diária. **Acta de la XLI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 6, 2018. Disponível em: <<http://www.exporenovables.com.ar/2018/descargas/actas/asades-tema-7-1.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- BEZERRA, A. F.. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa – MG, p. 73, 2009.
- BHERING, L. L. et al.. Application of neural networks to predict volume in eucalyptus. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 15, n. 3, p. 125-131, set. 2015. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1984-70332015000300125&lng=en&tIng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1984-70332015000300125&lng=en&tIng=en)>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- BINOTI, M. L. M, et al., Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 4, ago. 2013. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622013000400007&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622013000400007&script=sci_arttext)>. Acesso em: 26 out. 2020.
- BRAGA, A. D. P. et al.. Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 226, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Florestas do Brasil em resumo: 2019. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Serviço Florestal Brasileiro** - Brasília: MAPA/SFB, p. 207, 2019.
- BUENO, G. F. et al.. Efeito do número de neurônios na cama oculta para relações hipsométricas de eucalipto usando redes neurais artificiais. **Biofix Scientific Journal**, Universidade Federal do Paraná, v. 5, n. 2, p. 222-230, 2020. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/biofix/article/view/71374/40442>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- CABACINHA, C. D, LAFETÁ, B. O.. Florestic diversity and equitability in forest fragments using artificial neural networks. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 1, p 143-152, 2017. Disponível em <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982017000100143&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982017000100143&script=sci_arttext)>. Acesso em: 22 out. 2020.
- CÁCERES FLORESTAL. **Manual do cultivo de teca**, p. 16, 2006. Disponível em: <[http://www.caceresflorestal.com.br/Manual\\_do\\_cultivo\\_da\\_teca-Caceres\\_Florestal.pdf](http://www.caceresflorestal.com.br/Manual_do_cultivo_da_teca-Caceres_Florestal.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2020.
- CALLEGARI-JACQUES, S. M.. **Bioestatística – Princípios e Aplicações**. Porto Alegre: ArtMed, p. 264, 2011.

- CAMINO R, MORALES JP.. Las plantaciones de teca em América Latina: mitos y realidades. **Turrialba**: CATIE (Informe Técnico n. 397); p 1-392, 2013. Disponível em: <<http://www.ibiologia.unam.mx/gela/tecalibro.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- CAMPOS, B. P. F. et al.. Predição da altura total de árvores em plantios de diferentes espécies por meio de redes neurais artificiais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 88, p. 375-385, 01 jan. 2016. Trimestral. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/1166>>. Acesso em: 01 mar. 2020.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G.. Mensuração Florestal: perguntas e respostas. 5. ed. Viçosa: **Editora UFV**, p. 636, 2017.
- CARDOSO, D. J.. **Avaliação da influência dos fatores sítio, idade, densidade e posição sociológica na relação hipsométrica para *Pinus taeda* nas regiões central e sudoeste do Estado do Paraná**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 1-128, jan. 1985. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/cerne/v16n3/a10v16n3.pdf>>. Acesso em 13 dez. 2019.
- CASTRO, R. V. O. et al.. Individual Growth Model for Eucalyptus Stands in Brazil Using Artificial Neural Network. **Isrn Forestry**, [s.l.], v. 2013, p. 1-12, 2013. Hindawi Limited. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/196832>. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2013/196832/>>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- CERQUEIRA, E. O. et al.. Redes neurais e suas aplicações em calibração multivariada. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p 864-873, 2001. Disponível em: < [https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010040422001000600025&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010040422001000600025&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 27 out. 2020.
- CHICHORRO, J. F. et al.. Equações de volume e de *taper* para quantificar multiprodutos da madeira em floresta atlântica. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 27, n. 6, p 799-809, 2003. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rarv/v27n6/a06v27n6.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- CONCEIÇÃO, F. X. et al.. Capacidade de produtividade do sítio em povoamentos jovens de *Tectona grandis* L. f. de duas regiões do estado de Mato Grosso – Brasil. **Revista Brasileira Bioma**, Lavras, v. 34, n. 2, p 233-242, 2016. Disponível em: < <https://www.scielo.br/pdf/cr/v42n5/a12612cr5538.pdf> >. Acesso em 28 out. 2020.
- CORNELIO, D. L., Reforestation planning based on plant hardiness zones in Vitilevu island, Fiji. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XLIII-B4-2020, XXIV ISPRS, 2020. Disponível em: <<https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLIII-B4-2020/539/2020/isprs-archives-XLIII-B4-2020-539-2020.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- COSENZA, D. N. et al.. Site classification for eucalypt stands using artificial neural network based on environmental and management features. **Cerne**, [s.l.], v. 23, n. 3, p. 310-320, set. 2017. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602017000300310&lng=en&tlng=en](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602017000300310&lng=en&tlng=en)>. Acesso em: 14 abr. 2020.
- COSTA-FILHO, S. V. S. et al.. Configuração de algoritmos de aprendizado de máquina na modelagem florestal: um estudo de caso na modelagem da relação hipsométrica.

- Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 4, fev. 2020. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982019000401501&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1980-50982019000401501&script=sci_arttext)>. Acesso em: 27 out. 2020.
- CURTO, R. A. et al.. Métodos de estimação de altura de árvores em floresta estaciona semidecidual. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 43, n. 1, p 105-116, mar. 2013. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/26791>>. Acesso em 28 out. 2020.
- DEB, J. C. et al.. Climatic-induced shifts in the distribution of teak (*Tectona grandis*) in tropical Asia: implications for forest management and planning. **Environmental Management**, v. 60, n. 3, p 422-435, 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00267-017-0884-6>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- DOBNER, M. J. et al.. Crescimento e desempenho econômico de *Eucalyptus dunnii* em diferentes sítios no planalto sul do Brasil. **Revista Florestal**, v. 47, n. 4, 2017. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/45745>>. Acesso em 28 out. 2020.
- DRAPER, N.; SMITH, H. Applied regression Analysis 3rd Edition John Wiley and Sons. **New York**, 1997
- DUPUY, B.; VERHAEGEM, D.. Le teck de plantation *Tectona grandis* em Cted'Ivoire. **Bois et Forêts des Tropics**, n.235, p.9-24, 1993.
- ESTEBAN, L. G. et al.. Application of artificial neural networks as a predictive method to differentiate the wood of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn subsp. *salzmannii* (Dunal) Franco. **Wood Science and Technology**, [s.l.], v. 51, n. 5, p. 1249-1258, jun. 2017. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s00226-017-0932-7>>. Acesso em: 12 abr. 2020.
- FAO. Global Forest Resources Assessment 2000. **FAO Forestry Paper 140**, 2001. Disponível em: <<http://www.fao.org/DOCREP/004/Y1997E/y1997e00.htm>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- FAO. Global Forest Resources Assessment 2010. Brazil Country Report. **FAO Forestry Paper 140**, 2009. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/al464E/al464E.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- FELICIANO, M. E. et al.. Avaliação de diferentes hipsômetros na estimativa da altura total. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 2, 2016. Disponível em: <<https://www.gvaa.com.br/revista/index.php/RVADS/article/view/3741>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- FERREIRA, J. C. B. et al.. Altura de mudas da *Tibouchina granulosa* CONG. (MELASTOMATACEAE) estimada por redes neurais artificiais. **Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 9, n. 1, p 151-160, 2014. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revsbau/article/view/66600/38374>>. Acesso em 26 out. 2020.
- FERREIRA, J. C. S. et al.. Eficiência relativa de modelos volumétricos com e sem a variável altura da árvore. **Revista ACTA Tecnológica**, v. 6, n. 1, jun. 2011. Disponível: <<https://portaldeperiodicos.ifma.edu.br/index.php/actatecnologica/article/view/45/49>>. Acesso em: 28 out. 2020.

- FIGUEIREDO, E. O.. Avaliação do crescimento da teca (*Tectona grandis*. Lf.) para análise de tronco. Rio Branco: **Embrapa Acre** (Embrapa Acre Instruções Técnicas n. 35), p. 1-4, 2001. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/495888/avaliacao-do-crescimento-da-teca-tectona-grandis-l-f-pela-analise-de-tronco>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- FIGUEIREDO, E. O. et al.. Teca (*Tectona grandis* L.f.): principais perguntas do futuro empreendedor florestal. **Embrapa**, Rio Branco – AC, 2005. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/504317/teca-tectona-grandis-l-f-principais-perguntas-do-futuro-empreendedor-florestal>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- FILHO, A. F. et al.. Evolution of the hypsometric relationship in *Araucaria angustifolia* plantations in the mid-south region of Paraná State. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 3, p. 347-357, jun. 2010. Disponível em : <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0104-77602010000300010](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-77602010000300010)>. Acesso em : 20 jun. 2020.
- FILHO, S. V. S. C. et al.. Configuração de algoritmos de aprendizado de máquina na modelagem florestal: um estudo de caso na modelagem da relação hipsométrica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 1501-1515, dez. 2019. Disponível em : <<https://doi.org/10.5902/1980509828392>>. Acesso em : 20 out. 2020.
- FINGER, C.C. Fundamentos de biometria florestal. Santa Maria **UFSM/CEPEF/FATEC**, p. 269,1992.
- FISZELEW, A. et al.. Finding optimal neural network architecture using genetic algorithms. **Advances in Computer Science and Engineering**, v. 27, p 15-24, 2007. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.447.662&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- GARDNER, M. W.; DORLING, S. R.. Artificial neural networks (the multilayer perceptron) a review of applications in the atmospheric sciences. **Pergamon**, v. 32, n. 14/15, p 2627-2636, 1998. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1352231097004470>>. Acesso em: 23 out. 2020.
- GOH, D. ; MONTEUUIS, O.. Rationale for developing intensive teak clonal plantations with special reference to Sabah. **Bois et Forest des Tropiques**, v. 28, n. 3, p 5-15, 2005. Disponível em : <<https://pdfs.semanticscholar.org/6f26/220faf520663d5d465bee1975be70f7435d2.pdf>>. Acesso em : 25 out. 2020.
- GUERROUT EH, AIT-AOUDIA S, MICHELUCCI D, MAHIOU R (2018). Hidden Markov random field model and Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno algorithm for brain image segmentation. **Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence**, v. 29, n. 5, p. 415-427, 2017. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/0952813X.2017.1309692?journalCode=teta20>>. Acesso em: 20 out. 2020.
- GUPTA, T. K.; RAZA, K.. Optimization of ANN architecture: a review on nature-inspired techniques. **Machine Learning in Bio-Signal Analysis and Diagnostic Imaging**, capítulo 7, p. 159-182, 2019. Disponível em:

<<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128160862000072?via%3Dihub>>. Acesso em 27 out. 2020.

- HAIR, J. F. et al.. Análise Multivariada de Dados. 6. ed. São Paulo: **Bookman**, p. 1-682, 2009.
- HAYKIN, S.. Redes neurais: princípios e prática. 2. ed. Porto Alegre: **Bookman**, p. 902, 2001.
- HINKLE, D. E., et al.. Applied statistics for the behavioral sciences. **Cengage Learning**, Boston: [s. n.], v. 5, p. 756, 2003.
- IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES). **Relatório Anual de 2019**. São Paulo – SP: IBÁ, p. 80, 2019. Disponível em: <[https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2019.pdf](https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2019.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2019.
- IBÁ (INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES). **Relatório Anual de 2020**. São Paulo – SP: IBÁ, p. 66, 2020. Disponível em: <<https://iba.org/publicacoes>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2 ed. Rio de Janeiro, RJ, p. 217, 2012.
- IMEA. **Diagnóstico de florestas plantadas no Estado de Mato Grosso**. Cuiabá, MT, p. 106. 2013.
- IPFE (INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS). **Tectona grandis (Teca)**. Disponível em: <<https://www.ipef.br/identificacao/tectona.grandis.asp>>. Acesso em: 12 set. 2019.
- IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS). **Teca**. Disponível em: <[https://www.ipt.br/informacoes\\_madeiras/78-teca.htm](https://www.ipt.br/informacoes_madeiras/78-teca.htm)>. Acesso em: 18 set. 2019.
- JESUS, C. M et al.. Avaliação de diferentes hipsômetros para medição da altura total em um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. **Enciclopédia biosfera**. Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 8, n. 15, p. 291, 2012. Disponível em: <[https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16218/1/ARTIGO\\_AvaliacaoDiferentesHipsometros.pdf](https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/16218/1/ARTIGO_AvaliacaoDiferentesHipsometros.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2020.
- KEOGH, R. M.. Does teak have a future in tropical America? **Unasyuva**, v. 31, n. 126, p. 13-19, 1979.
- KESS, S. M. et al.. Índice de sitio para *Prosopis alba* em la província del Chaco. **Actas de los resúmenes de las XVII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales**, 2017. Disponível em: <[https://inta.gob.ar/sites/default/files/indice\\_de\\_sitio\\_para\\_prosopis\\_alba\\_en\\_la\\_provincia\\_de\\_chaco.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/indice_de_sitio_para_prosopis_alba_en_la_provincia_de_chaco.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2020.
- KOASA-ARD, A.. Teak (*Tectona grandis* Linn. f) its natural distribution and related factors. **Nat. His. Bull. Siam Soc**, n. 29, p 55-74, 1989. Disponível em: <[https://thesiamsociety.org/wp-content/uploads/2020/04/NHBSS\\_029\\_g\\_KaosaArd\\_TeakTectonaGrand.pdf](https://thesiamsociety.org/wp-content/uploads/2020/04/NHBSS_029_g_KaosaArd_TeakTectonaGrand.pdf)>. Acesso em: 25 out. 2020.
- KOHLER, S. V. et al.. Estratégias de agrupamento de dados para a modelagem hipsométrica e seus reflexos na estimativa de volume em plantios de *Pinus spp*. **Rev. Floresta**, v. 47, n.

3, p. 307-316, 2017. Disponível em:  
<<https://revistas.ufpr.br/floresta/article/view/50555>>. Acesso em 28 out. 2020.

KOLLERT, W.; CHERUBINI, L.. Teak resources and market assessment 2010. **FAO Planted Forests and Trees Working Paper FP/47/E**, Roma, Italia, 2012. Disponível em:  
<<http://www.fao.org/3/a-an537e.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

KOLLERT, W.; KLEINE, M.. The Global Teak Study: Analysis, Evaluation and Future Potential of Teak Resources. **International Union of Forest Research Organizations (IUFRO)**, v. 36, p. 108, jun./2017. Disponível em:  
<<https://www.iufro.org/publications/series/world-series/article/2017/06/21/world-series-vol-36-the-global-teak-study-analysis-evaluation-and-future-potential-of-teak-reso/>>. Acesso em: 29 ago. 2019.

KOLLERT, W.; WALOTEK, P.. Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban. **FAO Planted Forests and Trees Working Paper FP/47/E**, Roma, Italia, 2015. Disponível em: <<http://www.fao.org/forestry/plantedforests/67508@170537/en/>>. Acesso em: 05 ago. 2019.

KRISHNAPILLAY, B.. Silviculture and management of teak plantations. **UnasyIva**, v. 51, n. 201, p. 14-21, 2000. Disponível em:  
<<http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/x4565e/X4565E03.PDF>>. Acesso em: 20 set. 2019.

LAMPRECHT, H.. Silvicultura nos Trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas – Possibilidade e métodos de aproveitamento sustentado. Tradução de Guilherme de Almeida - Sedas e Gilberto Calcagnotto. Eschborn: Dt. Ges. für Techn.Zusammenarbeit (GTZ), **GmbH**, p 1-343, 1990.

LAURO, A. C. et al.. Operacionalidade de instrumentos na obtenção da altura total de árvores em sistema agrossilvipastoril. **Advances in Forestry Science**, Cuiabá, v. 5, n. 4, p. 445-451 2018. Disponível em:  
<<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/afor/article/view/6166>>. Acesso em 28 out. 2020.

LEITE, H. G. et al.. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, [s.l.], v. 130, n. 2, p. 263-269, 26 ago. 2010. Disponível em:  
<<https://link.springer.com/article/10.1007/s10342-010-0427-7>>. Acesso em: 12 abr. 2020.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L.. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 27, n. 3, p 301-310, 2003. Disponível em: < <https://www.scielo.br/pdf/rarv/v27n3/a05v27n3.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.

LORENZI, H.. Árvores exóticas no Brasil: madeireiras, ornamentais e aromáticas. **Nova Odessa: Instituto Plantarum**, p. 368, 2003.

MACHADO, A. S. et al.. Classificação de sítios para Bracatingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 35, p 21-37, dez. 1997.

Disponível em:  
<<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/282171/1/machado.pdf>>.  
Acesso em: 28 out. 2020.

- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.. Dendrometria. 2. Ed. Guarapuava: **UNICENTRO**, p. 316, 2009.
- MAEDA, E. E.. Predicting forest fire in the brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 11, p. 265-727, 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0303243409000233>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- MANESCHY, R. Q. et al.. Viabilidade econômica de Sistemas Silvopastoris com *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* e *Tectona grandis* no Pará. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 60, p. 49-56, dez. 2009. Edição Especial.
- MARTINS, E. R. et al.. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 2, p. 117-123, 2016. Disponível em: <<https://www.redalyc.org/pdf/1190/119046408009.pdf>>. Acesso em 27 out. 2020.
- MARTINS, S. V.. Restauração Ecológica de Ecossistemas Degradados. 2. ed. Viçosa, Minas Gerais: **Editora UFV**, p. 376, 2015.
- MATOS, F. S. et al.. Crescimento de plantas de *Tectona grandis* sob restrição hídrica. **Revista Agrarian**, Dourados, v. 11, n. 39, p. 14-21, 2018.
- MATRICARDI, W. A. T. **Efeitos dos fatores do solo sobre o desenvolvimento da teca (*Tectona grandis* L.F.) cultivada na Grande Cáceres – Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado) – Curso Ciência Florestal. ESALQ, Universidade de São Paulo (USP), p. 135, 1989.
- MELO, E. A. et al.. Modelagem não linear da relação hipsométrica e do crescimento das árvores dominantes e codominantes de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 4, p. 1325-1338, dez. 2017.
- MELO, F. R. et al.. Generalizador Neural de Espaços de Aprendizagem em Sistemas Tutores Inteligentes. **XVII Simpósio Brasileiro de Informática na Educação – SIBIE – UNB/UCB**, 2006. Disponível em: <<https://br-ie.org/pub/index.php/sbie/article/view/474/460>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- MENDONÇA, A. R. D. et al.. Modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Pesquisa florestal brasileira**, Colombo, v. 35, n. 81, p. 47-54, jan. 2015. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/710/408>>. Acesso em: 14 out. 2019.
- MENDONÇA, A. R. et al.. Estimação da altura total de árvores de ipê felpudo utilizando modelos de regressão e redes neurais artificiais. **Revista Brasileira Bioma**, Lavras, v. 36, p. 121-139, 2018. Disponível em: <<http://www.biometria.ufla.br/index.php/BBJ/article/view/154/163>>. Acesso em 23 out. 2020.

- MENDONÇA, A. R. et al.. Modelos hipsométricos e de crescimento em altura das árvores dominantes e codominantes para *Pinus caribaea* var. hondurensis. **Scientia Florestalis**, v. 39, n. 90, p. 151-160, jun. 2011. Disponível: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/710>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- MEUNIER, I. M. J. et al.. Inventário florestal: Programas de Estudo. Recife: **Imprensa Universitária da UFRPE**, p. 189, 2001.
- MIDGLEY, S. et al.. Global market for plantation teak; implications for growers in Lao PDR. ACIAR FST/2010/012: **Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra**, p. 75, 2015. Disponível em: <<http://laoplantation.org/wp-content/uploads/2018/08/VALTIP-Teak-Market-Report-Midgley-et-al.pdf>>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- MIGUEL, E. P. et al.. Modelagem hipsométrica em povoamentos híbrido clonal de Eucalyptus. **Agrarian**, [s.l.], v. 11, n. 40, p. 159-167, 28 maio 2018. Universidade Federal de Grande Dourados. Disponível em: <<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/3324>>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- MIGUEL, E. P. et al.. Using artificial neural networks in estimating wood resistance. **Maderas Ciencia Y Tecnologia**, v. 20, n. 4, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.4067/S0718-221X2018005004101>>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- MIRANDA, R. O. V. et al.. Modelagem da mortalidade em povoamentos *Pinus taeda* L. **Forest Science**, Piracicaba, v. 45, n. 115, p. 435-444, set. 2017. Disponível em: <<dx.doi.org/10.18671/scifor.v45n115.02>>. Acesso em 20 out. 2020.
- MOREIRA, M. F. B. et al.. Estimativa da relação hipsométrica com modelos não lineares ajustados por métodos bayesianos empíricos. **Cerne**, v. 2, n. 3, p. 405-411, 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/cerne/v21n3/2317-6342-cerne-21-03-00405.pdf>>. Acesso em 28 out. 2020.
- MOTTA, J. P. et al.. Resistência natural da madeira de *Tectona grandis* em ensaio de laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 43, n. 8, ago. 2013. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010384782013005000097&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S010384782013005000097&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 25 out. 2020.
- NADIKATTU, R. R.. The supremacy of artificial intelligence and neural networks. **International Journal of Creative Research Thoughts**, v. 5, n. 1, mar. 2017. Disponível em: <[https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3655849](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3655849)>. Acesso em: 27 out. 2020.
- NETO, E. M. C. et al.. Redes neurais artificiais e regressão na estimativa da altura em povoamento experimental misto e equiâneo. **Caderno de Ciências Agrárias**, UFMG – MG, v. 10, n. 3, 2018. Disponível: <<https://periodicos.ufmg.br/index.php/ccaufmg/article/view/3039>>. Acesso em: 28 out. 2020.

- NOGUEIRA, G. S. **Modelagem da produção de povoamentos de eucalipto utilizando diferentes metodologias**. Dissertação (Mestrado) – Curso Ciência de Florestal. Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, p. 77, 2017.
- NORDAHLIA, A. S. et al.. Wood properties of selected plantation species: *Tectona grandis* (teak), *Neolamarckia cadamba* (Kelempayan/Laran), *Octomeles sumatrana* (BINUANG) and *Paraserianthes falcataria* (Batai). **Technology Bulletin**, Ministry of Natural Resources and Environment, Malasya, n. 54, 2014.
- PANDEY, D.; BROWN, C.. Teak: a global overview. **Unasyuva**, v. 51, n. 201, p. 3-12, 2000. Disponível em: <<http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/x4565e/X4565E02.PDF>>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- PANGASTUTI, S. et al.. Pengaruh lama simpan entres jati (*Tectona grandis*) dalam media pelepah pisang terhadap keberhasilan okulasi. **Jurnal Sylva Lestari**, v. 6, n. 1, p 50-57, jan. 2018. Disponível em: <<http://jurnal.fp.unila.ac.id/index.php/JHT/article/download/1802/1573>>. Acesso em: 20 out. 2020.
- PELISSARI, A. L. et al.. Cultivo da teca: características da espécie para implantação e condução de povoamentos florestais. **Agrarian Academy**, Goiânia, v. 1, n. 1, p. 127-146, abr./2014. Disponível em: <<http://www.conhecer.org.br/Agrarian%20Academy/2014a/cultivo.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2019.
- PORTAL ACTION. **Multicolinearidade**. Disponível em: <<http://www.portalaction.com.br/analise-de-regressao/362-multicolinearidade>>. Acesso em: 07 jan. 2020.
- RAIYANI, D.. Economics, Market and Price: Plantation Teak. Olam International. **Paper presented to the World Teak Conference**. Bangkok, Thailand, 25-27, mar. 2013.
- REIS, C.A.F.; PALUDZYSZYN FILHO, E.. Estado da arte de plantios com espécies florestais de interesse comercial para o Mato Grosso. Colombo: **Embrapa Florestal** (Embrapa Florestas. Documento, 215), 65p, 2011.
- REVISTA MADEIRA. Curitiba, v. 19, n. 118, p 1-98, 2009.
- RIBEIRO, A. et al.. Estratégias e metodologia de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras – MG, v. 16, n. 1, mar. 2010. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602010000100003&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602010000100003&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 28 out. 2020.
- RIBEIRO, A. et al.. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus* sp. **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 22-31, mar. 2010. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602010000100003&script=sci\\_abstract&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-77602010000100003&script=sci_abstract&tlng=pt)>. Acesso em: 07 jan. 2020.
- ROCHA, H. F. et al.. Plantios comerciais de *Tectona grandis* L. f. no Brasil. **Multitemas**, Campo Grande, MS, n. 48, p 9-28, dez. 2015. Disponível em: <<https://www.interacoes.ucdb.br/multitemas/article/view/137/173>>. Acesso em: 20 out. 2020.
- ROCHA, V. A. M. et al.. Análise comparativa entre RNA, AG e Migha na Determinação de Rugosidades Através de Calibração de Redes Hidráulicas. **Revista Brasileira de**

- Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 125-134, mar. 2013. Disponível em: <[https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/97/0f1f90b98415136db26703ffdb8d3d70\\_19bbd7974b09c3781ebf8171ddc8a2cd.pdf](https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/97/0f1f90b98415136db26703ffdb8d3d70_19bbd7974b09c3781ebf8171ddc8a2cd.pdf)>. Acesso em: 28 out. 2020.
- ROSHETKO, J. M. et al.. Teak systems' contribution to rural development in Indonesia. **World Teak Conference 2013**, Bangkok, Thailand, p. 24-27 mar. 2013. Disponível em: <<http://apps.worldagroforestry.org/downloads/Publications/PDFS/PP13129.PD>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- RUFFIER, R. P. et al.. Aplicação de redes neurais ao estudo da capacidade de carga de fundações à tração. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica**, Curitiba – Paraná, 1998. Disponível em: <<https://www.ericolisboa.eng.br/artigos/cobram98.pdf>>. Acesso em: 27 out. 2020.
- SANQUETTA, C. R. et al.. Inventários Florestais: Planejamento e Execução. 3. Ed. Curitiba: **Multigraphics**, p. 406, 2014.
- SANTOS, C. M. M.. Estabilidade dimensional da madeira de teca (*Tectona grandis* L. F.) em diferentes regiões do xilema. **8º Seminário de Iniciação Científica**, IFRO – Campus Coloração do Oeste, nov. 2018. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Cassio\\_Santos6/publication/343219624\\_Dimensional\\_stability\\_of\\_teak\\_Tectona\\_grandis\\_LF\\_wood\\_in\\_different\\_regions\\_of\\_the\\_xylem/links/5f1d463145851515ef4aa3ff/Dimensional-stability-of-teak-Tectona-grandis-LF-wood-in-different-regions-of-the-xylem.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Cassio_Santos6/publication/343219624_Dimensional_stability_of_teak_Tectona_grandis_LF_wood_in_different_regions_of_the_xylem/links/5f1d463145851515ef4aa3ff/Dimensional-stability-of-teak-Tectona-grandis-LF-wood-in-different-regions-of-the-xylem.pdf)>. Acesso em: 29 out. 2020.
- SANTOS, H. G., et al.. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, p. 353, 2013.
- SANTOS, M. J. F.; ANDRADE, V. C. L. Modelos de relação hipsométrica para um fragmento de cerrado *sensu stricto* no sul do estado do Tocantins. **Magistra**, Cruz das Almas – BA, v. 30, p. 225-236, 2019. Disponível em: <>. Acesso em 29 out. 2020.
- SANTOS, M. J. F. et al.. Amostragem relativa de dados da relação hipsométrica de cerrado tocaninense. **Revista Brasileira Bioma**, Lavras, v. 34, n. 4, p. 633-645, 2016. Disponível em: <<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/8241>>. Acesso em 29 out. 2020.
- SANTOS, M. L. et al.. Hypsometric models for a clonal plantation of *Tectona grandis* Linn F. subjected to selective thinning. **Revista Agro@ambiente**, Roraima, v. 13, p. 35-45, 2019. Disponível em: <<https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/5292>>. Acesso em: 13 abr. 2020.
- SANTOS, M. L. et al.. Relação altura-diâmetro para um povoamento clonal jovem de *Tectona grandis* Linn F. na Amazônia oriental, Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 10, p. 74981 – 74996, out. 2020. Disponível em: <<https://www.brazilianjournals.com/index.php/BRJD/article/view/17749>>. Acesso em: 29 out. 2020.
- SCHMIDT, P. B. **Determinação indireta da relação hipsométrica para povoamentos de *Pinus taeda* L.** Curitiba. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná, p. 102, 1997.

- SCHUHLI, G. S.; PALUDZYSZYN, E. F.. O cenário da silvicultura de teca e perspectivas para o melhoramento genético. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 30, n. 63, p 217-230, out. 2010. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/25279/1/84-895-2-PB.pdf>>. Acesso em: 26 out. 2020.
- SCOLFORO, J. R. S. Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas Lavras: **UFLA/FAEPE**, MG, v. 1, p. 433, 2008.
- SELLE, G. L. et al.. Classificação de sítio para *Pinus taeda* L., através da altura dominante para região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 75-95, 1994. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/cflo/v4n1/1980-5098-cflo-04-01-00077.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- SELLE, G. L. et al.. Como Classificar Sítios Florestais Através da Altura Dominante do Povoamento. **Embrapa Florestas**, Colombo, PR, 2008. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/315106/1/Doc166.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- SHIBLEE, M.D.; CHANDRAB, B.; KALRAA, P.K. Learning of geometric mean neuron model using resilient propagation algorithm. **Expert Systems with Applications**, v.37, p.7449-7455, 2010.
- SILVA, A. R. et al.. Comportamento da *Tectona grandis* sob sistema silvipostoril em Terra Alta – Pará. **VI Simpósio de estudos e pesquisas em ciências ambientais na Amazônia**, Belém (PA), dez. 2017. Disponível em: <<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1085697/1/anaistcompletosimp osio2017volume105.pdf>>. Acesso em: 25 out. 2020.
- SILVA, G. F.. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 36, n. 2, p 341-348, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rarv/v36n2/a15v36n2.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- SILVA, G. F. et al.. Influência de diferentes fontes de erro sobre as medições de alturas de árvores. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 3, p. 394-405, jul. 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/cerne/v18n3/a06v18n3>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- SILVA, I. N. D. et al.. Redes Neurais Artificiais: para engenharia e ciências aplicada. 1. ed. São Paulo: **ArtLiber**, p. 399, 2010.
- SILVA, J. N. M., LOPES, J. C. A. Inventário florestal contínuo em florestas tropicais: a metodologia utilizada pela Embrapa- CPATU na Amazônia Brasileira. **Embrapa-CPATU**, 33, p 1-36, 1986. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/381691/1/CPATUDoc33.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.
- SILVA, P. V.. **Emprego de redes neurais artificiais com skip-layer connections na mensuração florestal**. Dissertação (Mestrado) – Curso Ciência Florestal. UFVMG, Minas Gerais, p. 55, 2015.
- SOARES et al.. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, v. 28, n. 6, Viçosa, dec. 2004. Disponível em:

<[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622004000600009&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622004000600009&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 26 out. 2020.

SOARES, C. P. B; et al.. Dendrometria e Inventário Florestal. 2. ed. Viçosa, Minas Gerais: **Editora UFV**, p. 272, 2011.

SOARES, T. S. et al.. Uso de diferentes alternativas para viabilizar a relação hipsométrica no povoamento florestal. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 28, n. 6, p. 845-854, 2004. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622004000600009&script=sci\\_arttext&tlng=pt](https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-67622004000600009&script=sci_arttext&tlng=pt)>. Acesso em: 27 out. 2020.

SOUZA, C. A. M. **Avaliação de modelos de taper não segmentados e segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp.**. Dissertação (Mestrado) – Curso Produção Vegetal. Universidade Federal do Espírito Santo, p. 53, 2015.

SOUZA, C. A. M. et al.. Avaliação de modelos de afilamento segmentados na estimação da altura e volume comercial de fuste de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa – MG, v. 32, n. 3, p. 453-463, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/pdf/rarv/v32n3/a08v32n3.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2020.

TIERRA, A. R. T. C..**Metodologia para a geração da malha de anomalias gravimétricas para obtenção de geóide gravimétrico local a partir de dados esparsos**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR.

TOSUN, M.; DINCER, K. Determination of sound transmission loss in lightweight concrete walls and modeling artificial neural network. **Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi**, v. 6, n. 3, p. 461–477, 2018. Disponível em: <<http://acikerisimarsiv.selcuk.edu.tr:8080/xmlui/handle/123456789/13114>>. Acesso em: 27 out. 2020.

TRIOLA, M. F. Introdução a Estatística. **Atualização da Tecnologia**. 11 ed. Brasil: LTC, p. 707, 2013.

VEIT, L.F. Plante seu fundo de aposentadoria. **Revista Silvicultura**, São Paulo, v.17, n. 68, p. 20-22, 1996

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al.. Dominant height growth in *Tectona grandis* plantations in Mato Grosso, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, 2019. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2179-80872019000400129](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-80872019000400129)>. Acesso em: 26 out. 2020.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al.. Estimativa da altura de árvores de *Tectona grandis* L.f. utilizando regressão e redes neurais artificiais. **Revista Nativa**, São Paulo, v. 5, n. 1, p. 52-58, 2017. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/3738>>. Acesso em: 01 out. 2020.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al.. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais. **Revista Brasileira de Biometria**, São Paulo, v. 33, n. 4, p. 556-569, 2015. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/3738>>. Acesso em: 01 mar. 2020.

- VENDRUSCOLO, D. G. S. et al.. Height prediction of *Tectona grandis* trees by mixed effects modelling and artificial neural networks. **International Journal of Current Research**, v. 8, n. 12, p. 43189-53195, 2016. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/312087971\\_HEIGHT\\_PREDICTION\\_OF\\_TECTONA\\_GRANDIS\\_TREES\\_BY\\_MIXED\\_EFFECTS\\_MODELLING\\_AND\\_ARTIFICIAL\\_NEURAL\\_NETWORKS](https://www.researchgate.net/publication/312087971_HEIGHT_PREDICTION_OF_TECTONA_GRANDIS_TREES_BY_MIXED_EFFECTS_MODELLING_AND_ARTIFICIAL_NEURAL_NETWORKS)>. Acesso em: 28 out. 2020.
- WAHOUNOU, P. J. et al.. Teak (*Tectona grandis*) decay associated with *Verticillium* sp. and *Fomes* sp. within reforestation areas in cote d'ivoire. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 29, n. 3, p. 363-370, 2017. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/44272914?seq=1>>. Acesso em 22 out. 2020.
- WAHOUNOU, P. J. et al.. Teak (*Tectona grandis*) decay associated with *Verticillium* sp. and *Fomes* sp. within reforestation areas in cote d'ivoire. **Journal of Tropical Forest Science**, v. 29, n. 3, p. 363-370, 2017. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/44272914?seq=1>>. Acesso em 22 out. 2020.
- WENDLING, W. T.. **Metodologia para elaboração de tarifas de volume individual. Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 1978. 143 p.
- WEST, P.W.. **Functions to estimate three height and bark 'thickness Of tasmanian regrowth eucalyptus**. **Australian Forest Research, Australia**, v. 12, n. 3, p. 183-190. 1982.
- ZANON, M. L. B. et al.. Funções para descrever a relação altura diâmetro de *Eucalyptus dunnii* Maiden. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 26, n. 1, p. 87-90, jan./1996. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-84781996000100016](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84781996000100016)>. Acesso em: 25 nov. 2019.
- MACHADO, I. E. S. et al.. Modelos hipsométricos ajustados para um fragmento de cerrado sensu stricto tocantinense. **Revista Agrogeoambiental**, Pouso Alegre, v. 11, n. 1, mar. 2019, Disponível: <<https://pdfs.semanticscholar.org/943f/df7557ad03b64771f60a8c3570a803e2cddd.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2020,
- OLIVEIRA, F. G. R. B. et al.. Desempenho de modelos hipsométricos para um povoamento de *Eucalyptus urophylla* no município de Jaguaquara, Bahia. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer – Goiânia, v. 7, n. 13, p. 331-338, 2011. Disponível em: <<https://www.conhecer.org.br/enciclop/2011b/ciencias%20agrarias/Desempenho%20de%20modelos.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2020.
- ANDRADE. V. C. L. et al.. Amostragem e agrupamento de dados de relação hipsométrica em inventários florestais de Cerrado Tocantinense. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo. v. 35. n.83. p. 227-238. set. 2015. Disponível em: <<https://pfb.cnpf.embrapa.br/pfb/index.php/pfb/article/view/683/430>>. Acesso em: 25 nov. 2020.

## 8. ANEXOS

Anexo 1: Representação gráfica da correlação entre alturas observadas e previstas (A), distribuição dos erros de estimativa (B) e histograma da frequência de erro relativo gerado pela equação não linear 2 (C), ajustada aos dados dos povoamentos clonais *T. grandis* na Amazônia oriental, Brasil.

