

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

**TESE**

**Crescimento Radial e Propriedades Tecnológicas da Madeira de *Tectona grandis* Linn F. Frente as Variações Climáticas e Ocorrência de Evento El Niño na Amazônia**

**Fábio Henrique Della Justina do Carmo**

**2022**



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

**CRESCIMENTO RADIAL E PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DA  
MADEIRA DE *Tectona grandis* Linn F. FRENTE AS VARIAÇÕES  
CLIMÁTICAS E OCORRÊNCIA DE EVENTO EL NIÑO NA  
AMAZÔNIA**

**FÁBIO HENRIQUE DELLA JUSTINA DO CARMO**

*Sob a Orientação do Professor*  
**João Vicente de Figueiredo Latorraca**

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

Seropédica, RJ  
Agosto de 2022

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

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

C287c Carmo, Fábio Henrique Della Justina do, 1991-  
Crescimento radial e propriedades tecnológicas da  
madeira de *Tectona grandis* Linn F. frente as variações  
climáticas e ocorrência de evento El Niño na Amazônia  
/ Fábio Henrique Della Justina do Carmo. -  
Seropédica, 2022.  
74 f.: il.

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

1. Tecnologia de produtos florestais. 2. *Tectona  
grandis* Linn F.. 3. Anéis de crescimento. 4.  
Sensoriamento remoto. 5. Anatomia da madeira. I.  
Latorraca, João Vicente de Figueiredo, 1962-, orient.  
II Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Pós  
Graduação em Ciências Ambientais e Florestais III.  
Título.

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

**FÁBIO HENRIQUE DELLA JUSTINA DO CARMO**

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Ciências Ambientais e Florestais**, no Curso de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais, área de concentração em Ciência e Tecnologia de Produtos Florestais.

TESE APROVADA EM 31/08/2022

**TERMO N° 1056/2022 - DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)**

**N° do Protocolo: 23083.062670/2022-66**

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 09:45)*  
JOAO VICENTE DE FIGUEIREDO LATORRACA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)  
Matricula: 1216943

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 09:47)*  
BRUNO ARAUJO FURTADO DE MENDONCA  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptSil (12.28.01.00.00.00.31)  
Matricula: 2145654

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 10:26)*  
ALEXANDRE MONTEIRO DE CARVALHO  
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR  
DeptPF (12.28.01.00.00.00.30)  
Matricula: 1486653

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 09:59)*  
GRAZIELA BAPTISTA VIDAURRE  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 078.905.237-77

*(Assinado digitalmente em 07/10/2022 12:21)*  
CAROLINA NOGUEIRA XAVIER  
ASSINANTE EXTERNO  
CPF: 133.377.787-63

Para verificar a autenticidade deste documento entre em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **1056**, ano: **2022**, tipo: **TERMO**, data de emissão: **07/10/2022** e o código de verificação: **2f02cde2a8**

## DEDICATÓRIA

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus.

Aos meus pais, Terezinha Della Justina e Jair Figueiredo do Carmo, por todo o carinho e ensinamento ao longo da vida e por sempre me incentivarem a estudar. Aos meus irmãos, Jáder Augusto Della Justina do Carmo e Gabriela Della Justina do Carmo, por todo o carinho.

À minha esposa e companheira, Maristela Volpato, por toda a cumplicidade, preocupação, amor e carinho ao longo desses anos.

Aos demais familiares, que de certa forma sempre estiveram torcendo por mim.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) e ao programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais e Florestais (PPGCAF) pela oportunidade de novos aprendizados.

Ao meu orientador, prof. Dr. João Vicente de Figueiredo Latorraca, pela orientação e parceria ao longo desses quatro anos e meio.

A Teak Resources Company (TRC) por ter cedido o material dessa pesquisa, em especial ao Eng. Florestal Sr. Fausto H. Takizawa.

Aos amigos que fiz durante esses anos: Aécio, Bianca, Cadu, Danilo, Glaycianne, Jonnys, José Henrique, Laís, Mailson, Marina, Osmar, Poliane, Thayanne, Victória, Wayka (e família).

Aos professores do PPGCAF por todos os ensinamentos e amizade.

A todos os funcionários da universidade que ajudaram na realização da pesquisa, direta ou indiretamente, em especial: Sr. Mário, Zé Mário, Daniel, Maurício, Sr. Jorge, Ari, dona Néia, Tiago e muitos outros com quem convivi durante esses anos.

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

## RESUMO GERAL

CARMO, Fábio Henrique Della Justina do. **Crescimento radial e propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* Linn f. frente as variações climáticas e ocorrência de evento El Niño na Amazônia.** 2022. 74p. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais e Florestais) – Instituto de Florestas, Departamento de Produtos Florestais, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

As condições do ambiente onde as plantas se localizam afetam o seu crescimento. Durante o desenvolvimento da planta, a assimilação de recursos permite que a planta invista em crescimento, reprodução, proteção etc. Em algumas espécies de árvores, essas informações ficam documentadas nos anéis de crescimento, que representam uma medida relativa do seu crescimento anual e podem inferir sobre o funcionamento da árvore para os próximos períodos. A partir dessas informações contidas nos anéis de crescimento é possível estudar quais as respostas/estratégias das plantas em um ambiente impulsionado pelas mudanças climáticas. Estas mudanças têm relação direta com a ocorrência de eventos climáticos extremos, como o El Niño, que é responsável pelo aumento da temperatura e redução da precipitação em várias partes do mundo, incluindo a região Amazônica. Assim, nesta pesquisa buscou-se avaliar o efeito do clima e da ocorrência de evento El Niño (2015/2016) no crescimento e nas propriedades tecnológicas da madeira de *Tectona grandis* Linn f.. Para isso 60 árvores, com 12 anos de idade, foram coletadas de um plantio localizado na região sudeste do estado do Pará. Estas árvores foram amostradas de forma destrutiva, retirando-se discos em diferentes alturas do fuste (base, 1,0, 4,1, 7,2 e 10,3 metros). Dos discos da base mediu-se a largura dos anéis de crescimento e avaliou-se a anatomia da madeira. Analisou-se também a densidade aparente, por anel, dos discos da base e demais alturas. Aliado ao estudo dos anéis de crescimento, empregou-se ferramentas de sensoriamento remoto para contribuir com a compreensão das respostas das árvores ao clima. Foram utilizados dados do sensor MODIS para obtenção do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Produtividade Primária Bruta (GPP) e do satélite Landsat-8 para obtenção do Fluxo de CO<sub>2</sub>. O NDVI foi utilizado para extração de métricas fenológicas de Início, Pico, Final e Comprimento do período de crescimento, considerando-se para isso a amplitude de seus valores, para cada período de crescimento, para definição de cada uma dessas métricas. Para avaliar a influência do evento de El Niño, considerou-se os períodos pré-El Niño (2012 e 2013), El Niño (2014 e 2015) e pós-El Niño (2016 e 2017). O GPP e o fluxo de CO<sub>2</sub> foram utilizados para ajudar na compreensão das respostas da árvore quanto ao acúmulo de biomassa, durante o evento de El Niño. O estudo demonstrou que o crescimento radial, o comprimento do período de crescimento, a dimensão dos elementos de vaso e a densidade da madeira se correlacionaram positivamente com a precipitação e negativamente com a temperatura, principalmente nos meses iniciais de crescimento. O evento de El Niño afetou de forma negativa o crescimento radial, as dimensões dos elementos de vaso e o acúmulo de biomassa. Além disso, observou-se que o comprimento do período de crescimento prévio afetou de forma negativa o crescimento radial corrente. Assim, demonstrou-se a aclimação da espécie ao clima e que, além de afetar diretamente a produtividade, o clima pode afetar também o crescimento do próximo período.

**Palavras-chave:** Anéis de crescimento, sensoriamento remoto, tecnologia da madeira, mudanças climáticas.

## GENERAL ABSTRACT

CARMO, Fábio Henrique Della Justina do. **Radial growth and technological properties of *Tectona grandis* Linn f. against climatic variations and the occurrence of El Niño event in the Amazon.** 2022. 74p. Thesis (Doctorate in Environmental and Forest Sciences) – Forest Institute, Department of Forest Products, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2022.

The conditions of the environment where the plants are located affect their growth. During the plant development, resources assimilation allows the plant to invest in growth, reproduction, protection, etc. For some tree species, this information is documented in the growth rings, which represent a relative measure of their annual growth and may infer about the operation of the tree for the next periods. From this information documented in the growth rings it is possible to study the responses/strategies of plants in an environment driven by climate change. Climate change have a direct relationship with the occurrence of extreme weather events, such as El Niño, responsible for increasing temperature and reducing precipitation in various parts of the world, including the Amazon region. Thus, this research aimed to evaluate the effect of climate and the occurrence of El Niño event (2015/2016) on the growth and technological properties of the wood of *Tectona grandis* Linn f.. We used 60 young trees, aged 12 years, from a plantation located in the southeast region of the state of Pará. The trees were sampled by destructive technique, removing discs at different heights of the stem (base, 1.0, 4.1, 7.2 and 10.3 meters). The discs from the base were used to measure the tree-ring width and to evaluate the wood anatomy. Also, the apparent density per ring, was analyzed using the discs from the base and other heights. Allied to the study of growth rings, remote sensing tools were used to contribute to the understanding of tree responses to climate. We used images from the MODIS sensor to obtain the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Gross Primary Productivity (GPP) and from landsat-8 satellite to obtain the CO<sub>2</sub> flux. The NDVI was used to extract phenological metrics of Start, Peak, End and Length of the growing season, considering the amplitude of its values, for each growth period, to define each of these metrics. To assess the influence of the El Niño event, we considered the pre-El Niño (2012 and 2013), El Niño (2014 and 2015) and post-El Niño (2016 and 2017) periods. Both GPP and CO<sub>2</sub> flux were used to better understand the tree's responses regarding biomass accumulation during the El Niño event. The study showed that radial growth, length of growth season, size of vessel elements and wood density were positively correlated with precipitation and negatively with temperature, especially in the initial months of growth season. The El Niño event negatively affected the radial growth, the vessel element size and biomass accumulation. In addition, it was observed that the length of the previous growth season negatively affected the current radial growth. Thus, our study demonstrated the acclimatization of the species to the climate and that, in addition to directly affecting productivity, the climate can also affect the growth of the next season.

**Keywords:** Growth rings, remote sensing, wood technology, climate change.



## LISTA DE TABELAS

<b>Table 1.</b> Descriptive statistics of the chronology of <i>Tectona grandis</i> . .....	12
<b>Tabela 2.</b> Médias das variáveis anatômicas de <i>Tectona grandis</i> entre os períodos de 2012 a 2017. ....	34
<b>Tabela 3.</b> Correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e as propriedades da madeira de <i>Tectona grandis</i> . ....	34
<b>Tabela 4.</b> Funções de afilamento testadas. ....	49
<b>Tabela 5.</b> Medidas de precisão dos modelos ajustados. ....	52
<b>Tabela 6.</b> Coeficientes estimados para o modelo de Polinômio de 5° Grau. ....	52
<b>Tabela 7.</b> Resumo da análise de variância univariada para ICA <sub>v</sub> , fCO <sub>2est.</sub> , GPP e NDVI nos períodos de 2013 a 2017. ....	53
<b>Tabela 8.</b> Médias das variáveis ICA <sub>v</sub> , fCO <sub>2est.</sub> , GPP e NDVI entre os períodos de 2013 e 2017 segundo teste de Scott-Knott. ....	54
<b>Tabela 9.</b> Matriz de correlação entre o ICA <sub>v</sub> , fCO <sub>2est.</sub> , GPP e NDVI. ....	55

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figure 1.</b> Map highlighting the distribution of the 12 plantations of <i>Tectona grandis</i> Linn F. ....	10
<b>Figure 2.</b> Average monthly (A) and annual (B) mean temperature and accumulated precipitation data of the meteorological station Conceição do Araguaia from 2007 to 2018..	11
<b>Figure 3.</b> Mean radial growth of tree-ring chronologies (black line) and individual tree growth rate (gray lines) of <i>Tectona grandis</i> . EPS: Expressed Population Signal; rBar: pairwise correlation. ....	13
<b>Figure 4.</b> Phenological metrics of Start (SOS), Peak (POS), End (EOS) (A) and Length (LOS) (days) (B) of growing season of the periods Pre-El Niño, El Niño, Post-El Niño and General, based on NDVI data. ....	14
<b>Figure 5.</b> Correlations between climatic variables and Length of growing season of <i>Tectona grandis</i> . Dashed lines identify the 95 % confidence limits. Black and gray bars identify the prior and current growth periods, respectively. ....	15
<b>Figure 6.</b> Tree ring width of <i>Tectona grandis</i> and El Niño – Southern Oscillation. ....	16
<b>Figure 7.</b> Correlations between climatic variables and tree-ring width of <i>Tectona grandis</i> . Dashed lines identify the 95 % confidence limits. Black and gray bars identify the prior and current growth periods, respectively. ....	17
<b>Figure 8.</b> Ordination diagram of the redundancy analysis between NDVI and tree-ring width of <i>Tectona grandis</i> and climatic variables. ....	18
<b>Figure 9.</b> Tree-ring width and Length of growing season (days) of <i>Tectona grandis</i> for prior growth period. ....	19
<b>Figura 10.</b> Mapa com a localização geográfica dos plantios de <i>Tectona grandis</i> e dados climáticos médios dos períodos 2012 a 2017. ....	31
<b>Figura 11.</b> Anatomia do lenho e perfil radial de densidade aparente de <i>Tectona grandis</i> . A: Seção transversal contendo elementos de vasos, fibras, parênquima axial e raios, sob a lente de 10x; B: Seção longitudinal tangencial evidenciando raios multisseriados, sob a lente de 10x; C: Perfil radial de densidade aparente (obtido por densitometria de raios-x) demonstrando menor densidade nos limites das camadas de crescimento. ....	33
<b>Figura 12.</b> Correlações entre as variáveis climáticas e as propriedades da madeira de <i>Tectona grandis</i> . As linhas indicam o limite de confiança de 95%. ....	35
<b>Figura 13.</b> Dados climáticos de Precipitação (mm), Temperatura máxima (°C) e ENSO, durante os períodos de 2013 a 2017, para a área de estudo. ....	51
<b>Figura 14.</b> Densidade aparente média por período de crescimento e em diferentes alturas. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada altura, pelo teste de Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ). ....	53
<b>Figura 15.</b> Incrementos Corrente Anual em volume (ICAv) e Biomassa aparente (ICAb) entre os períodos de 2013 e 2017. Médias seguidas pela mesma letra, para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ). ....	54

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL .....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	3
CAPÍTULO I.....	5
CLIMATE VARIATIONS AFFECT THE GROWTH PERIOD OF YOUNG <i>Tectona grandis</i> Linn F. IN THE AMAZON .....	5
RESUMO .....	6
ABSTRACT .....	7
1 INTRODUCTION.....	8
2 MATERIAL AND METHODS.....	10
2.1 Study Area .....	10
2.2 Climatic Data .....	11
2.3 Remote Sensing Products and Phenological Metrics .....	11
2.4 Tree-ring Analysis .....	12
2.5 Data Analysis .....	13
3 RESULTS.....	14
3.1 Effect of Climatic Variables on Phenological Metrics .....	14
3.2 Effect of Climatic Variables on Tree-ring Width .....	15
3.3 Effect of Climatic Variables on Phenological Metrics and Tree-ring Width .....	17
4 DISCUSSION.....	20
6 REFERENCES .....	23
CAPÍTULO II.....	27
CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DE <i>Tectona grandis</i> Linn f. DURANTE A SECA DO EVENTO DE EL NIÑO 2015/2016 NA AMAZÔNIA .....	27
RESUMO .....	28
ABSTRACT .....	29
1 INTRODUÇÃO.....	30
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	31
2.1 Área de estudo .....	31
2.2 Anatomia da madeira .....	31
2.3 Perfil de densidade da madeira .....	32
2.4 Dados climáticos.....	32
2.5 Análise dos dados .....	32
3 RESULTADOS .....	33
4 DISCUSSÕES .....	37
5 CONCLUSÕES.....	40

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	41
CAPÍTULO III .....	44
ACÚMULO DE BIOMASSA NO FUSTE DE <i>Tectona grandis</i> Linn F. DURANTE A SECA DO EVENTO EL NIÑO 2015/2016 NA AMAZÔNIA.....	44
RESUMO .....	45
ABSTRACT .....	46
1 INTRODUÇÃO.....	47
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
2.1 Área de estudo e amostragem do material .....	48
2.2 Densitometria de raios-X .....	48
2.3 Funções de afilamento .....	48
2.4 Análise de tronco .....	49
2.5 Produtos do sensoriamento remoto.....	49
2.6 Dados climáticos.....	50
2.7 Análise de dados .....	51
3 RESULTADOS .....	52
3.1 Funções de afilamento .....	52
3.2 Densitometria de raios-X.....	52
3.3 Efeito do El Niño na madeira e produtos do sensoriamento remoto .....	53
3.4 Relações entre o incremento e informações de sensoriamento remoto .....	54
4 DISCUSSÕES .....	56
5 CONCLUSÕES .....	58
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
2 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	62

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

Recentemente, pesquisas têm sido direcionadas para a importância que as mudanças climáticas têm sobre a produtividade florestal (DIÉ et al., 2015; DAI et al., 2019). Após a era pré-industrial, os crescimentos econômico e populacional aumentaram as emissões de gases de efeito estufa, como exemplo o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), também responsáveis por essas mudanças (EYRING et al., 2021). Parte do CO<sub>2</sub> é absorvido pelos sumidouros de carbono terrestre e oceânico, porém, grande parte desse gás permanece na atmosfera, contribuindo para o aquecimento global (EYRING et al., 2021). Com isso, a amplitude e frequência de eventos climáticos extremos como o El Niño do Pacífico Oriental tende a aumentar, causando alterações climáticas ao redor do mundo. O El Niño é um evento atmosférico-oceânico que ocorre nas águas superficiais do oceano pacífico, sendo que o aumento da temperatura provoca uma reorganização da circulação atmosférica, que resulta em eventos climáticos extremos ao redor do globo (HAM, 2018), como exemplo, a redução na precipitação e aumento da temperatura na região Amazônica (BARBOSA et al., 2019).

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, com uma área de aproximadamente 6.000.000,00 km<sup>2</sup>, sendo a sua extensão reflexo da alta pluviosidade, alta umidade e baixas oscilações de temperatura na região, de modo que tais características fazem com que o bioma seja o reservatório biológico mais rico e variado do mundo (BRITANNICA, 2019). A alta diversidade de espécies de plantas favoreceu, ao longo dos anos, a exploração madeireira, tornando esta uma das principais atividades econômicas na região. No entanto, em virtude da exploração em demasia que ocorre nas florestas nativas, os plantios florestais ganham espaço no cenário produtivo da região, onde já são encontrados plantios comerciais com mogno africano (*Khaya* spp.), paricá (*Schizolobium amazonicum*) e teca (*Tectona grandis*), por exemplo.

De acordo com dados da FAO (2012), a *Tectona grandis* Linn f. (teca) é a espécie de madeira tropical folhosa (hardwood), com destinação ao mercado de madeira serrada, mais plantada no mundo, correspondendo a 74% do total de plantações, sendo cultivada há mais de 150 anos em mais de 50 países. Segundo dados da IBÁ (2019), em 2018, havia 93.957 hectares (ha) da espécie plantados no Brasil, representando somente 1,20% da área total de plantios florestais do país e menos de 1% da madeira destinada para uso industrial. É uma espécie decídua pertencente à família botânica Lamiaceae, possui anéis de crescimento bem definidos, cerne de coloração marrom dourado com estratos bem demarcados, alborno de coloração amarelada, diferenciando-se do cerne (DJATI et al., 2015; ANDA et al., 2017). A espécie possui porosidade em anel do tipo poroso/semi-poroso, predominantemente solitários, apresentando-se de forma ovalada ou circular e arranjos no padrão radial. Possui parênquima axial paratraqueal escasso e vasicêntrico, podendo ser observado a olho nu, sendo de cor ligeiramente mais claro do que as fibras, os raios são homogêneos e visíveis a olho nu e as fibras librifórmes e curtas (ARIAS, 2013; CHAGAS, 2013; ANDA et al., 2017).

As características da madeira fazem com que a teca seja uma excelente espécie para condução de pesquisas dendrocrológicas, apresentando datação dos anéis a cada período de crescimento (PUMIJUMMONG, 2013). A dendrocronologia é uma ciência que analisa eventos que ficam marcados através do tempo ou que podem ser datados pelos anéis de crescimento das árvores (SPEER, 2009). As condições ambientais do local onde se desenvolve o indivíduo têm papel fundamental em seu crescimento e suas informações ficam documentadas nos anéis de crescimento das árvores. O novo anel formado representa tanto a medida relativa do seu crescimento anual, como também os meios em que o xilema irá se ajustar para contribuir com o futuro funcionamento da árvore (FONTI & BABUSHKINA, 2016).

Além dos anéis de crescimento com marcada distinção, outra importante característica da espécie é a sua fenologia. O fato de ser uma espécie que perde total ou parcialmente as folhas

durante um período do ano potencializa a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto, para obtenção de índices de vegetação, por exemplo, que auxiliam na compreensão das respostas das árvores frente às mudanças do clima, além das várias outras aplicações que essas ferramentas permitem. Uma nova etapa para compreensão do ciclo do carbono abrangendo a utilização dessas ferramentas iniciou-se há pouco, sendo possível a observação da dinâmica do carbono em escalas comparáveis a observações *in situ* (PALMER, 2018), o que contribuirá com a compreensão dos efeitos das mudanças climáticas sobre o ambiente.

Portanto, a demarcação dos anéis de crescimento e a fenologia da espécie permitem que a teca seja utilizada em estudos para compreender os impactos de mudanças no ambiente na produtividade e qualidade da madeira na região amazônica. Assim, o objetivo desta pesquisa foi avaliar o impacto do evento de El Niño, ocorrido nos anos de 2015/2016, no crescimento e nas propriedades da madeira de *Tectona grandis* Linn f.

A presente tese está estruturada em três capítulos em formato de artigo. No capítulo I, “Climate variations affect the growth period of young *Tectona grandis* Linn f. in the Amazon”, publicado na revista Acta Botanica Brasilica, verificou-se a influência da seca provocada pelo evento de El Niño no crescimento e fenologia, obtida através do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), da espécie. Assim, demonstrou-se que além de afetar diretamente a produtividade, o clima afeta também o comprimento do período de crescimento atual, bem como o comprimento do próximo período.

Em seguida é apresentado o capítulo II “Características da madeira de *Tectona grandis* Linn f. durante a seca do evento El Niño 2015/2016 na Amazônia” onde verificou-se a influência do clima nas propriedades anatômicas e física da madeira da espécie. Os resultados demonstraram que o evento de El Niño afetou as dimensões dos elementos de vaso da espécie, com a precipitação, em alguns meses do ano, influenciando na densidade aparente da madeira, indicando assim, a aclimação da teca ao evento de El Niño. O capítulo II está estruturado para ser submetido à revista Cerne.

Por último é apresentado o capítulo III “Acúmulo de biomassa no fuste de *Tectona grandis* Linn f. durante a seca do evento de El Niño 2015/2016 na Amazônia” no qual verificou-se a influência do evento no acúmulo de biomassa na árvore de teca, obtido por mensurações diretas no fuste e por mensurações indiretas através de imagens de satélite (Fluxo de CO<sub>2</sub>, GPP e NDVI). Os resultados demonstram os efeitos do evento no acúmulo de biomassa e que as ferramentas de sensoriamento utilizadas podem ajudar na compreensão das respostas das plantas em um ambiente em mudança.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDA, R. R. et al. Relationship of the cellular structure of teak wood (*Tectona grandis* L.f.) with different ages and growth sites. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**. v. 24, n. 1, p. 101-114, 2017.
- ARIAS, L. A. U. **Teak: New trends in silviculture, commercialization and wood utilization**. 1 ed. Cartago, C. R.: International Forestry and Agroforestry, 2013. 568 p.
- BARBOSA, M. L. F. et al. Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought. **Environment, Development and Sustainability**. v. 21, n. 6, p. 2707–2720, 2019. DOI: 10.1007/s10668-018-0157-4.
- BRITANNICA, T. Editors of Encyclopedia. "**Amazon Rainforest**." Encyclopedia Britannica, December 30, 2019. <https://www.britannica.com/place/Amazon-Rainforest>.
- CHAGAS, S. F. **Propriedades da madeira de *Tectona grandis* (L.f.), visando a sua utilização para peças preservadas**. 2013. 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2013.
- DAI, L. et al. Responses of biomass allocation across two vegetation types to climate fluctuations in the northern Qinghai–Tibet Plateau. **Ecology and Evolution**. v. 9, p. 6105-6115, 2019.
- DIÉ, A. et al. Tree rings show a different climatic response in a managed and non-managed plantation of teak (*Tectona grandis*) in West Africa. **IAWA Journal**. v. 36, p. 409-427, 2015.
- DJATI, I. D. et al. Sapwood of young teak from thinning as potential material for making products. **Bulletin of Japanese Society for the Science of Design**. v. 61, n. 5, 2015.
- EYRING, V. et al. **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p. 423–552, 2021.
- FONTI, P.; BABUSHKINA, E. A. Tracheid anatomical responses to climate in a forest-steppe in Southern Siberia. **Dendrochronologia**. v. 39, p. 32-41, 2016.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. 2012. **Teak resources and market assessment**. KOLLERT, W.; CHERUBINI, L. Planted forests and trees working paper FP/47/E. Rome, Italy.
- HAM, Y. G. El Niño events will intensify under global warming. **Nature**. v. 564, p. 192-193, 2018.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2019**. 2019. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>. Acesso em: 05/03/2021.

PALMER, P. I. The role of satellite observations in understanding the impact of El Niño on the carbon cycle: current capabilities and future opportunities. **Philosophical Transactions B**. v. 373, 2018.

PUMIJUMNONG, N. Dendrochronology in Southeast Asia. **Trees**. v. 27, p. 343-358, 2013.

SPEER, J. H. **Fundamentals of tree-ring research**. 3 ed. Indiana State University, Terre Haute, 2009.



# CAPÍTULO I

## CLIMATE VARIATIONS AFFECT THE GROWTH PERIOD OF YOUNG *Tectona grandis* Linn F. IN THE AMAZON<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> **Artigo publicado:** Carmo, F. H. D. J.; Latorraca, J. V. F.; Volpato, M.; Santos, G. C. V.; Souza, P. P.; Takizawa, F. H. Climate variations affect the growth period of young *Tectona grandis* Linn F. in the Amazon. **Acta Botanica Brasílica**, v. 36, 2022. DOI: 10.1590/0102-33062020abb0525.

## RESUMO

Espera-se que as mudanças climáticas aumentem a ocorrência de secas severas nos trópicos e pouco se sabe sobre sua influência na dinâmica das árvores. A largura do anel de crescimento das árvores e as ferramentas de sensoriamento remoto podem ajudar a entender os impactos das mudanças climáticas no crescimento das árvores. Nós avaliamos a aplicabilidade do NDVI para obtenção de métricas fenológicas (Início, Pico, Final e Comprimento do período de crescimento) e sua relação com a largura dos anéis de crescimento da *Tectona grandis* (teca). As métricas fenológicas e a largura dos anéis das árvores foram correlacionadas entre si e com variáveis climáticas locais (temperatura, precipitação, insolação solar, Índice padronizado de Precipitação e Evapotranspiração – SPEI) e de larga escala (El Niño). O comprimento do período de crescimento e a largura do anel de teca se correlacionaram positivamente com a precipitação e negativamente com a temperatura nos meses iniciais do período de crescimento. A largura dos anéis das árvores se correlacionou negativamente com eventos de El Niño. As variáveis climáticas e o comprimento do período de crescimento prévio se correlacionaram com a largura dos anéis das árvores do período de crescimento corrente. Este estudo demonstrou que, além de afetar diretamente a produtividade, o clima também pode afetar a duração do período de crescimento, podendo afetar também o crescimento das árvores no próximo período.

**Palavras-chave:** Dendrocronologia, El Niño, ENOS, métricas fenológicas, fenologia, SPEI, teca, índices de vegetação

## ABSTRACT

Climate change is expected to increase the occurrence of severe droughts in the tropics, and little is known about its influence on tree dynamics. Tree-ring width and remote sensing tools can help understand the impacts of climate change on tree growth. We evaluated the applicability of NDVI to obtain phenological metrics (e.g., start, peak, end, and length of growth season) and explored its relationship with tree-ring width of *Tectona grandis* (teak). The phenological metrics and tree-ring width were correlated with each other, and with both local (temperature, precipitation, solar insolation, Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI) and large-scale (El Niño) climatic variables. The length of season and tree-ring width of teak were positively correlated with precipitation and negatively correlated with temperature in the initial months of the growth period. Tree-ring width was negatively correlated with El Niño events. Climate variables and length of season from the prior period were correlated with the tree-ring width of the current growing period. This study demonstrated that rather than directly affecting productivity, climate might also affect the length of the growing season, which would affect tree growth in the next season.

**Keywords:** Dendrochronology, El Niño, ENSO, phenological metrics, phenology, SPEI, teak, vegetation index

## 1 INTRODUCTION

The impact of climate change on forest growth and productivity is a matter of concern. The impact of these changes tends to be greater in the tropics, promoting an increase in temperature in these regions (IPCC, 2014). Recent research indicates that the intensity and frequency of El Niño events tend to increase owing to climate change (HAM, 2018). The El Niño-Southern Oscillation (ENSO) is an atmosphere-ocean phenomenon that occurs in the equatorial Pacific Ocean. The eastern equatorial Pacific climate varies between anomalously cold (La Niña) and warm (El Niño) periods on a timescale of 2-7 years. These swings lead to variations in rainfall and weather patterns in several parts of the world (ACEITUNO, 1988; FOLEY et al., 2002; COLLINS et al., 2010), particularly in tropical forests, and can considerably affect large natural terrestrial carbon sinks, such as the Amazon rainforest.

For instance, rainfall in the Amazon is strongly driven by El Niño events. The warm phase decreases monthly precipitation and increases mean temperature. During El Niño, there is a reduction in total precipitation in the Amazon as the main convection center shifts to the central Pacific, and convection over the Amazon weakens (FOLEY et al., 2002). The event that occurred during 2015/2016 (strong event) caused a marked change in precipitation and temperature, compared to previous events (MOURA et al., 2019). The evaluation of these changes helps understand the effects of this phenomenon on local and global scales.

Climate change can be evaluated using dendrochronology. One of the fundamentals of this method is that variations in tree-ring width are influenced by environmental variables that affect tree growth (SPEER, 2012). Species that have more prominent growth rings and show sensitivity in response to environmental variations are suitable for these studies.

Another important tool for verifying the climate-plant relationship is the study of phenology, given that tree-rings are produced within the vegetative period which is dependent on the phenological behavior of trees. Phenology explores the stages of the plant development cycle, such as budding, flowering, fruiting, and senescence of the leaves (GHOSH et al., 2019). As climate affects tree growth and development, tree phenology can be used as a climatic change indicator (YU et al., 2017).

The monitoring and analysis of plants on a space-time scale can be conducted using vegetation indexes derived from remote sensing. Previous studies have demonstrated the association between the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and tree-ring width in some seasons (e.g., BARKA et al., 2019). Moreover, phenological metrics derived from high-resolution NDVI data (e.g., data provided by MODIS sensors) have the potential to improve the relationship between tree-ring width and climate (BHUYAN et al., 2017).

Data derived from satellite spectral measurements can be used to obtain information about the developmental period of this species. However, only a few programs can be used to extract and explore this information, such as TIMESAT (EKLUNDH & JÖNSSON, 2017). Several researchers have used software to extract phenological metrics in homogeneous and heterogeneous areas (HEUMANN et al., 2007; NHONGO et al., 2017; DIÊM et al., 2018; GHOSH et al., 2019). Phenological metrics are defined as the interannual changes in vegetation interpreted by spectral observation from satellite sensors, defining, for example, start of season (SOS), peak of season (POS), end of season (EOS) and length of season (LOS) (EKLUNDH & JÖNSSON, 2017; ZENG et al., 2020).

Thus, the use of tree-ring width and phenological metrics combined with remote sensing techniques can help understand the impact of climatic change on plant growth. Furthermore, it offers a cost-effective method of assessing large forest areas (VICENTE-SERRANO et al., 2016).

*Tectona grandis* (teak) was the first species used for dendrochronological studies in the tropics. In 1870, Dietrich Brandis studied the growth of teak and determined the cutting cycles

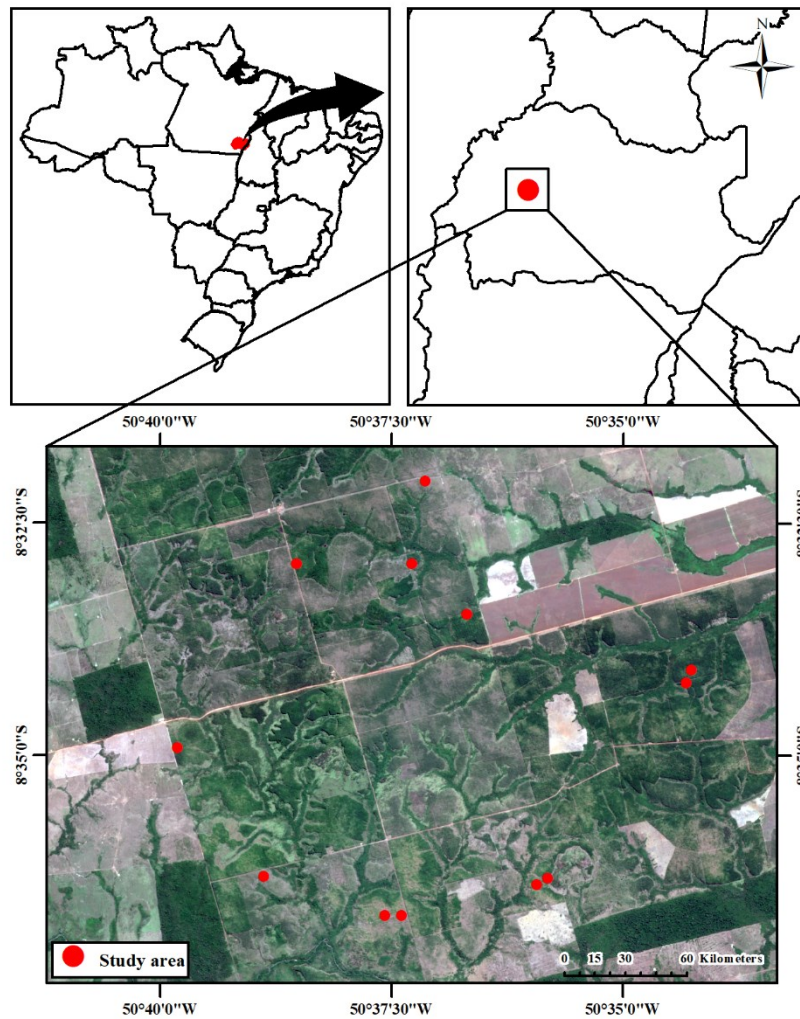
from tree-rings (JIMÉNEZ, 2011). *T. grandis* is one of the most used species for climate reconstruction from its growth rings due to its anatomical characteristics (LUMYAI & DUANGSATHAPORN, 2018; ZAW et al., 2020). It is a semi-ring-porous tropical hardwood with growth ring boundaries visually distinct by the variation in diameter of the vessel lumen and bands of marginal parenchyma at the limit of the growth period (DIÉ et al., 2015; SOUZA et al., 2019). It is a deciduous/semi-deciduous tree that sheds its leaves in the dry season (PELISSARI et al., 2014). This favors well-defined temporal coverage patterns. Therefore, remote sensing temporal observations can accurately capture these changes (GHOSH et al., 2019).

In this context, the main objective of this study was to evaluate the applicability of NDVI in extracting phenological metrics and to examine its relationship with the tree-ring width of *Tectona grandis* Linn F. Additionally, we analyzed the sensitivity of phenological metrics and tree-ring width to climatic variables due to the occurrence of an El Niño event in the Amazon.

## 2 MATERIAL AND METHODS

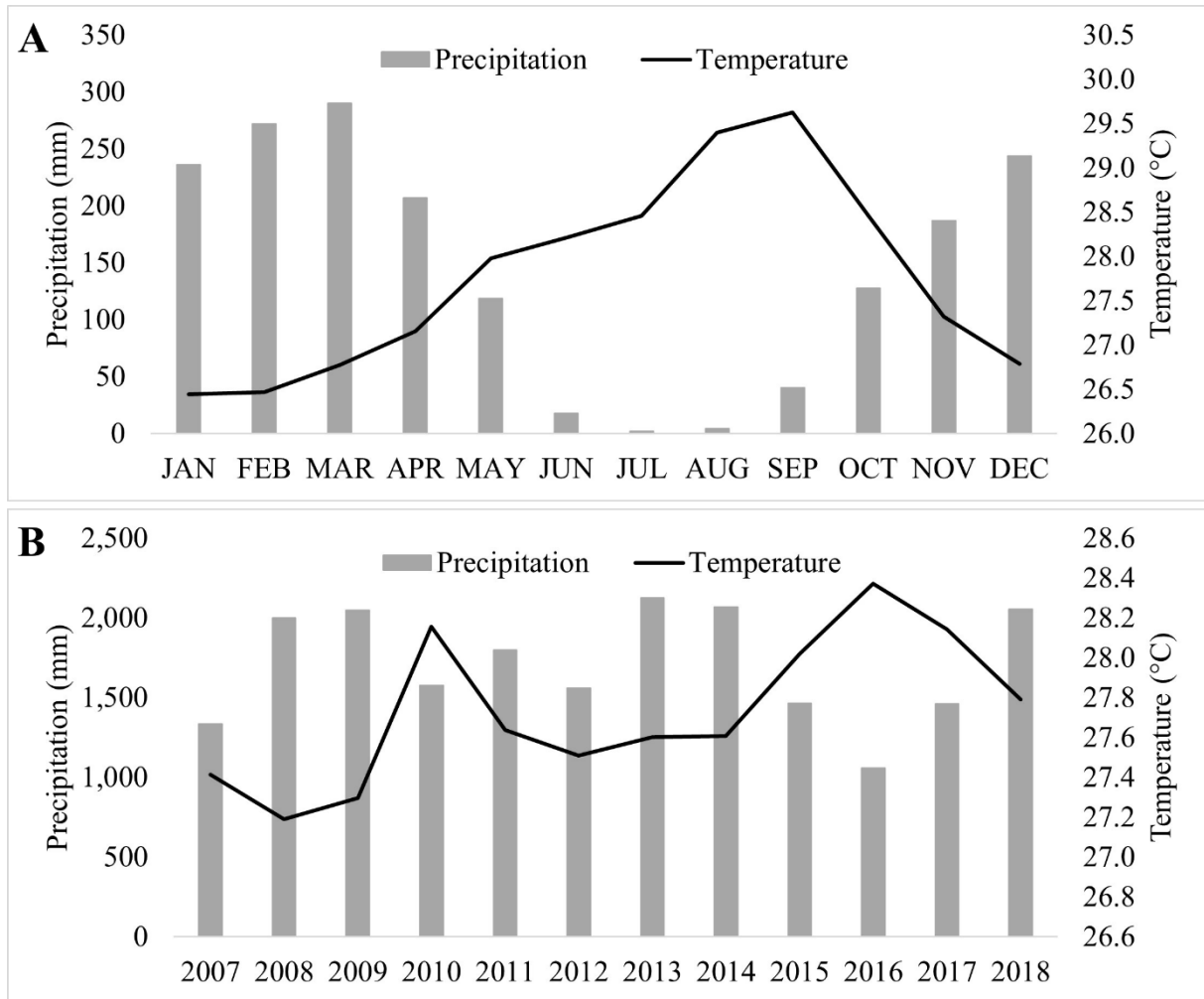
### 2.1 Study Area

This study was conducted in 12 teak plantations aged 12 years (2007 – 2018) in the southeastern region of the state of Pará, Brazil (Fig. 1). The plantations occupy approximately 30 hectares each. According to Köppen's classification, the climate is Tropical Aw. The mean temperatures of the coldest and warmest months are 18 and 22 °C, respectively. The precipitation in the driest month is less than 60 mm (ALVARES et al., 2013). The site experiences lower precipitation volume from June to August (LOPES et al., 2013) (Fig. 2A).



**Figure 1.** Map highlighting the distribution of the 12 plantations of *Tectona grandis* Linn F.

In the time series evaluated, there were two strong El Niño events (2010 and 2015/2016) (Fig. 2B). During 2015 and 2016 the mean annual temperatures were 0.3 and 0.7 °C higher, respectively, compared to the mean of the entire study period.



**Figure 2.** Average monthly (A) and annual (B) mean temperature and accumulated precipitation data of the meteorological station Conceição do Araguaia from 2007 to 2018.

## 2.2 Climatic Data

For the local scale, monthly climatic data on temperature, precipitation, solar insolation, and evapotranspiration were obtained from the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) at the conventional station of Conceição do Araguaia – PA.

The monthly Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) series were calculated. The SPEI is a multiscalar drought index based on precipitation and temperature data. It uses the monthly differences between precipitation and potential evapotranspiration (VICENTE-SERRANO et al., 2010). The SPEI was calculated using the SPEI package in R software (ver. 4.0.2, R Development Core Team 2020) (BEGUERÍA & VICENTE-SERRANO, 2017). For the large-scale assessment, data on sea surface temperature variations of the tropical Pacific Ocean (El Niño influence) were acquired from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). All climate data were acquired from 2007 to 2018.

## 2.3 Remote Sensing Products and Phenological Metrics

Data from Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the product MOD13Q1 V006 were used, with a temporal resolution of 16 days and a spatial resolution of 250 m. Tile h12v9 was applied, totaling 23 files per year.

The MODIS HDF files were downloaded from the NASA servers using the MODISstp package in R software (ver. 4.0.2, R Development Core Team 2020) (BUSETTO & RANGHETTI, 2016). The package was also used to reproject the files into the GeoTIFF format

and Datum WGS-84. The NDVI values for the areas were extracted from each pixel. All pixels were selected from the center of each plantation to ensure that they represented only *T. grandis* trees. Only good-quality pixels obtained by “MODIS quality control” were used. A linear interpolation method was used to obtain the missing pixels. These pixels, which accounted for 12.67 % of the total pixels, were mostly non-sequential, and occurred in the months with the highest rainfall intensity (February and March), owing to cloud cover. As there were two observations in each month (temporal resolution of 16 days), the interpolated data did not affect the seasonal patterns.

The NDVI was used as an indirect measure of phenology as it is an indirect measure of the vegetative period of the canopy. For each plantation, the NDVI data were organized in ASCII files, which were used to estimate phenological metrics (e.g., start (SOS), peak (POS), end (EOS) and length (LOS) of the growing season) using the TIMESAT software package (ver. 3.3) (EKLUNDH & JÖNSSON, 2017). TIMESAT implements three processing methods based on the least-squares of the vegetation index: asymmetric adaptive Savitzky-Golay, Gaussian, and Double Logistic. The results of each method were compared visually and statistically using the coefficient of determination ( $R^2$ ). The asymmetric adaptive Savitzky-Golay method was used to estimate the phenological metrics. The method is used for smoothing noise in the NDVI time series using a weighted moving average filter (CHEN et al., 2004).

The phenological dates of SOS and EOS were estimated using 20 % of the seasonal amplitude (GHOSH et al., 2019). For the analysis, we considered the mean of each phenological metric from the 12 plantations. We used the period of 2015/2016 (El Niño) as a reference to evaluate the effect of El Niño events on phenological metrics. The El Niño period was compared with 2014/2015 (pre-El Niño) and 2016/2017 (post-El Niño). The El Niño event that occurred in 2010 was not used because of the planting age, which could influence the NDVI values.

## 2.4 Tree-ring Analysis

For tree-ring analysis, we collected five discs, from each plantation, taken at an approximate height of 0.50 m from the ground. The discs were polished with a sandpaper gradient varying between 40 and 600 grains  $\text{cm}^{-2}$  until the ring boundaries could be clearly identified. Discs were scanned at a resolution of 1,200 dpi (Epson Perfection V700 Photo). Two radial lines were laid down on each polished disc and then analyzed with Cybis CooRecorder software (version 7.8) accurate to 0.01 mm (LARSSON, 2014).

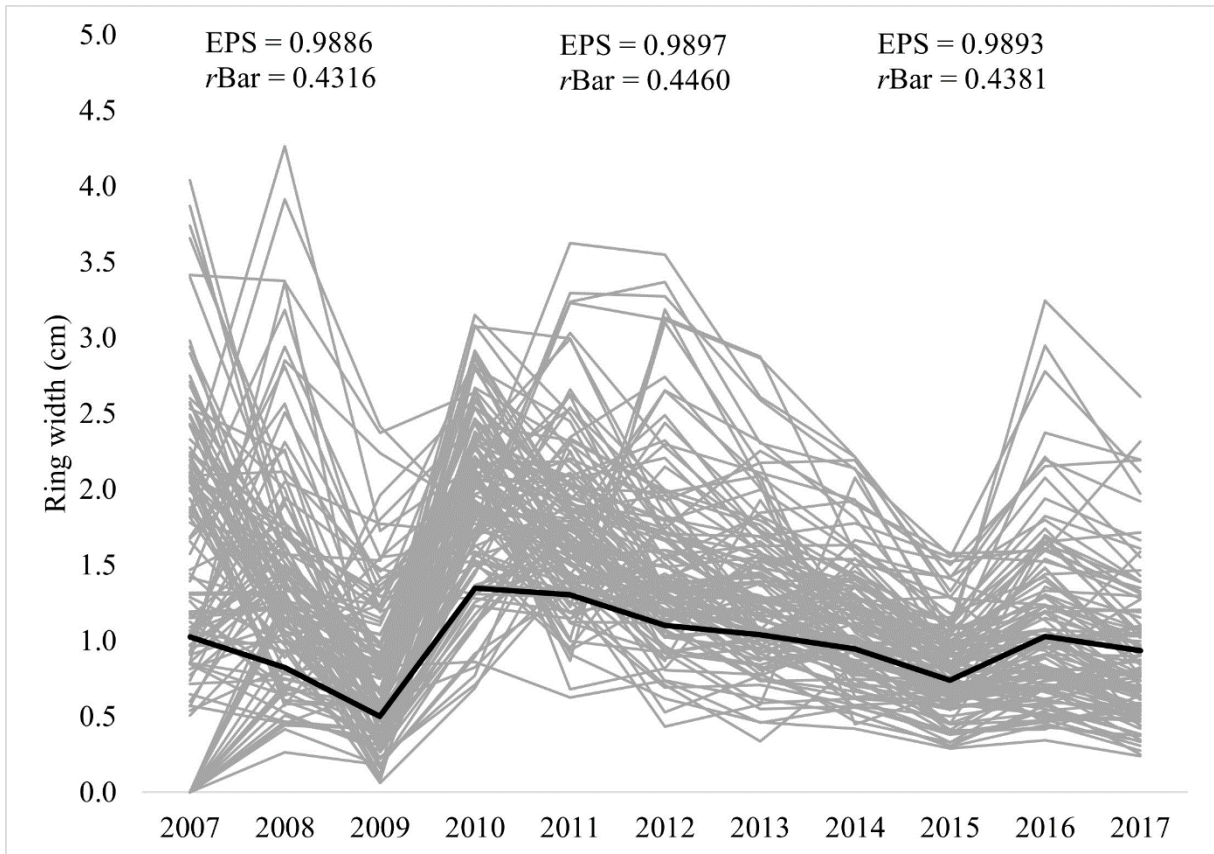
The quality of the cross-dating was verified using the COFECHA software (HOLMES, 1983). The annual growth series were fitted to a cubic spline with a 50 % frequency, with 4 years segments lagged by 2 years and a critical correlation of 0.6581 was applied. The tree-ring width was standardized using ARSTAN software (COOK & HOLMES, 1996), and detrended using a linear regression of any slope. The mean chronology was calculated using the averaged standardized tree-ring series (FRITTS, 1976).

The classic statistical parameters in dendrochronology, i.e., average tree-ring width, standard deviation, mean sensitivity, and series intercorrelation were used to describe the chronology (FRITTS, 1976) (Tab. 1). The quality of the chronology was analyzed by the mean correlation coefficient for all possible pairings of ring width series over a common time mean correlation ( $r_{\text{Bar}}$ ) and the expressed population signal (EPS) (Fig. 3).

**Table 1.** Descriptive statistics of the chronology of *Tectona grandis*.

Mean ring width $\pm$ standard deviation (cm)	Mean sensitivity	Series intercorrelation
1.31 $\pm$ 0.639	0.405	0.701





**Figure 3.** Mean radial growth of tree-ring chronologies (black line) and individual tree growth rate (gray lines) of *Tectona grandis*. EPS: Expressed Population Signal; rBar: pairwise correlation.

## 2.5 Data Analysis

The length of season of pre-El Niño, El Niño and post-El Niño periods were tested using analysis of variance and Tukey's post hoc test ( $\alpha = 0.05$ ). The influence of local monthly climatic variables on the length of season was tested using Pearson's correlation analysis ( $\alpha = 0.05$ ).

Ring widths were correlated with climatic variables (local) from the prior periods (May to August – dry season) and current growth periods (September to May – rainy season) by Pearson's correlation analysis ( $\alpha = 0.05$ ). To better comprehend the results, we considered the period from September to August, as the beginning of the growth season starts in September (start of the rainy season). For example, with respect to 2009, the current period runs from September 2009 to August 2010, and the prior period runs from September 2008 to August 2009.

To assess the sensitivity of tree-ring width to large-scale (ENSO) events, we conducted an annual correlation for the current and prior periods using Pearson's correlation analysis ( $\alpha = 0.05$ ). The mean annual ENSO index of the study period was considered in the analysis.

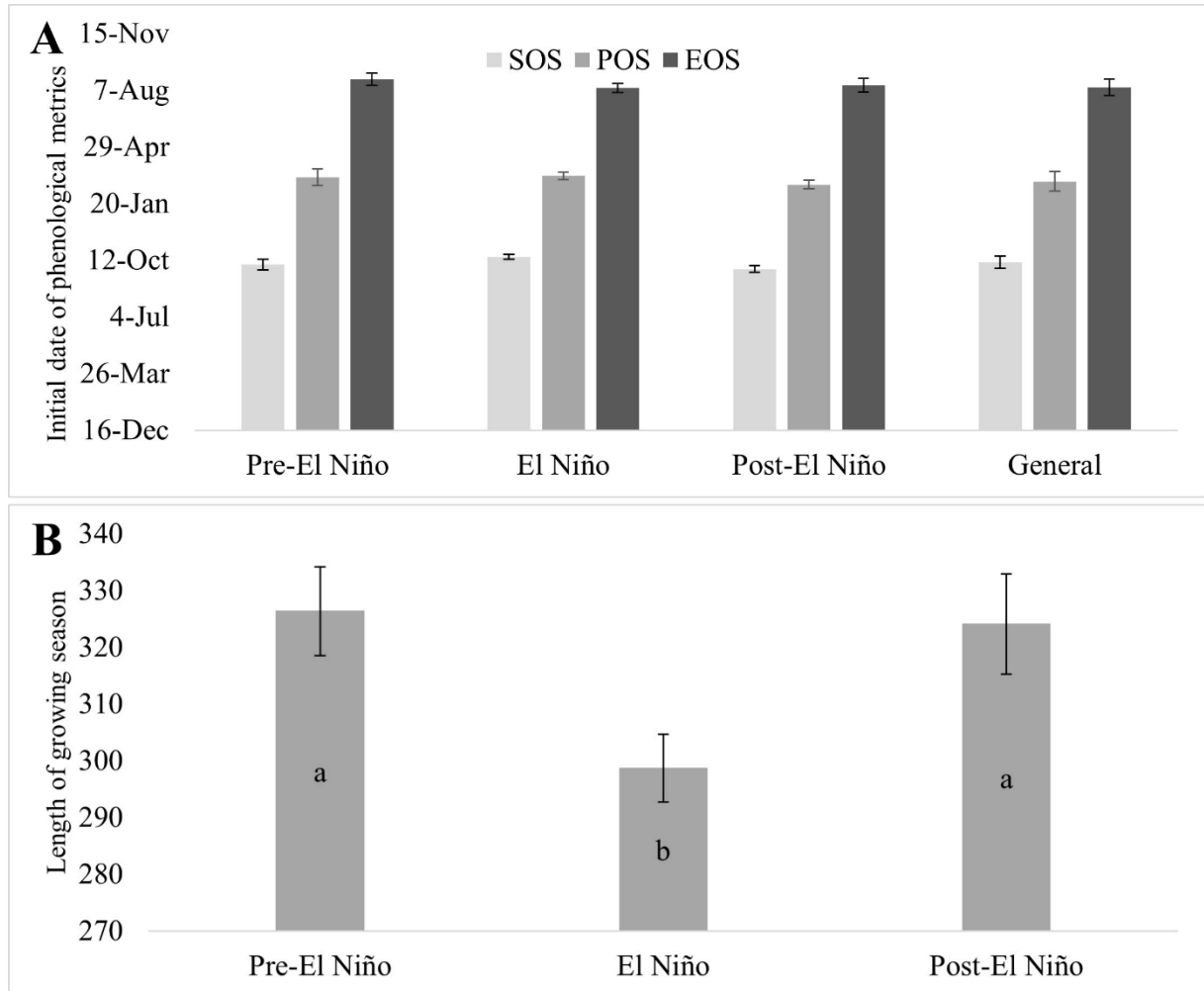
In addition, to verify the association between tree-ring width and NDVI (derived from phenology) with climatic variables (monthly), we used the Redundancy Analysis (RDA) method. The test was conducted using the vegan package in the R software (OKSANEN et al., 2019), with 999 permutations under a full permutation model.

The association between the length of season (current and prior period) and tree-ring width was tested using Pearson's correlation analysis ( $\alpha = 0.05$ ). We used the Shapiro-Wilk test ( $\alpha = 0.05$ ) to check for data normality.

### 3 RESULTS

#### 3.1 Effect of Climatic Variables on Phenological Metrics

Based on the phenological metrics (2010 – 2018) extracted from TIMESAT, the start (SOS), peak (POS), and end (EOS) of growing season occurred on October 08, February 28, and August 12, respectively (Fig. 4A). The length of the growing season (LOS) was 307 days.

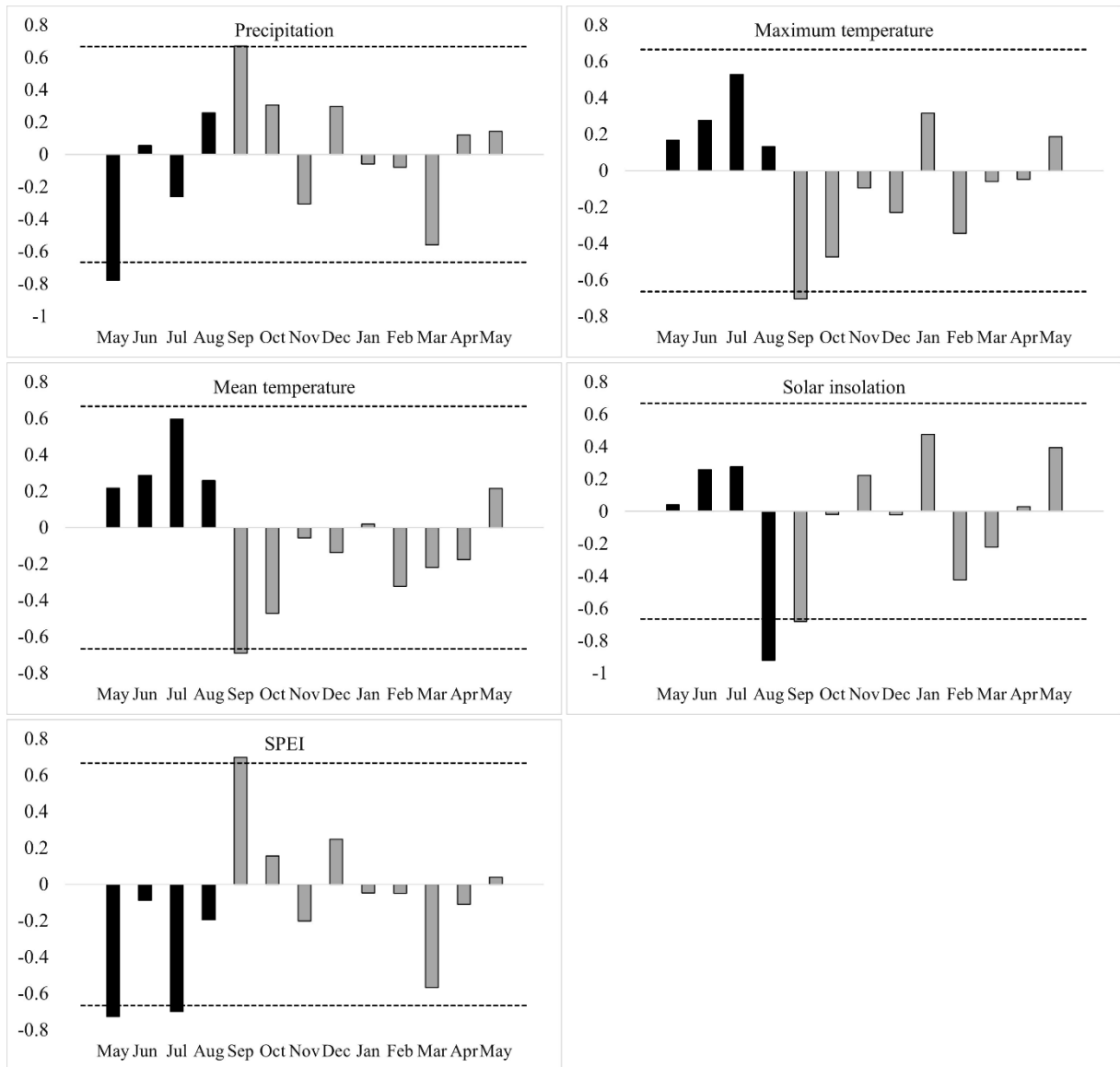


**Figure 4.** Phenological metrics of Start (SOS), Peak (POS), End (EOS) (A) and Length (LOS) (days) (B) of growing season of the periods Pre-El Niño, El Niño, Post-El Niño and General, based on NDVI data.

During the pre-El Niño period, the SOS occurred 14 days earlier and the EOS occurred 14 days later when compared with El Niño period (Fig. 4A). Thus, the LOS of the pre-El Niño period was 28 days longer than that of the El Niño period. During post-El Niño period, the SOS occurred 21 days earlier, the EOS occurred 5 days later (Fig. 4A), and the LOS was 26 days longer than the El Niño period. The LOS of the pre-El Niño and post-El Niño periods were statistically greater than that during the El Niño period (Fig. 4B). These results indicate that the El Niño event affects the vegetative period of teak.

Solar insolation (hours), maximum temperature, and mean temperature in September were negatively correlated with LOS ( $r = -0.681$ ,  $p\text{-value} = 0.043$ ;  $r = -0.705$ ,  $p\text{-value} = 0.034$ ; and  $r = -0.690$ ,  $p\text{-value} = 0.039$ , respectively) (Fig. 5). Precipitation and SPEI, also in September, were positively correlated with LOS ( $r = 0.670$ ,  $p\text{-value} = 0.048$ ; and  $r = 0.698$ ,  $p\text{-value} = 0.039$ , respectively) (Fig. 5).

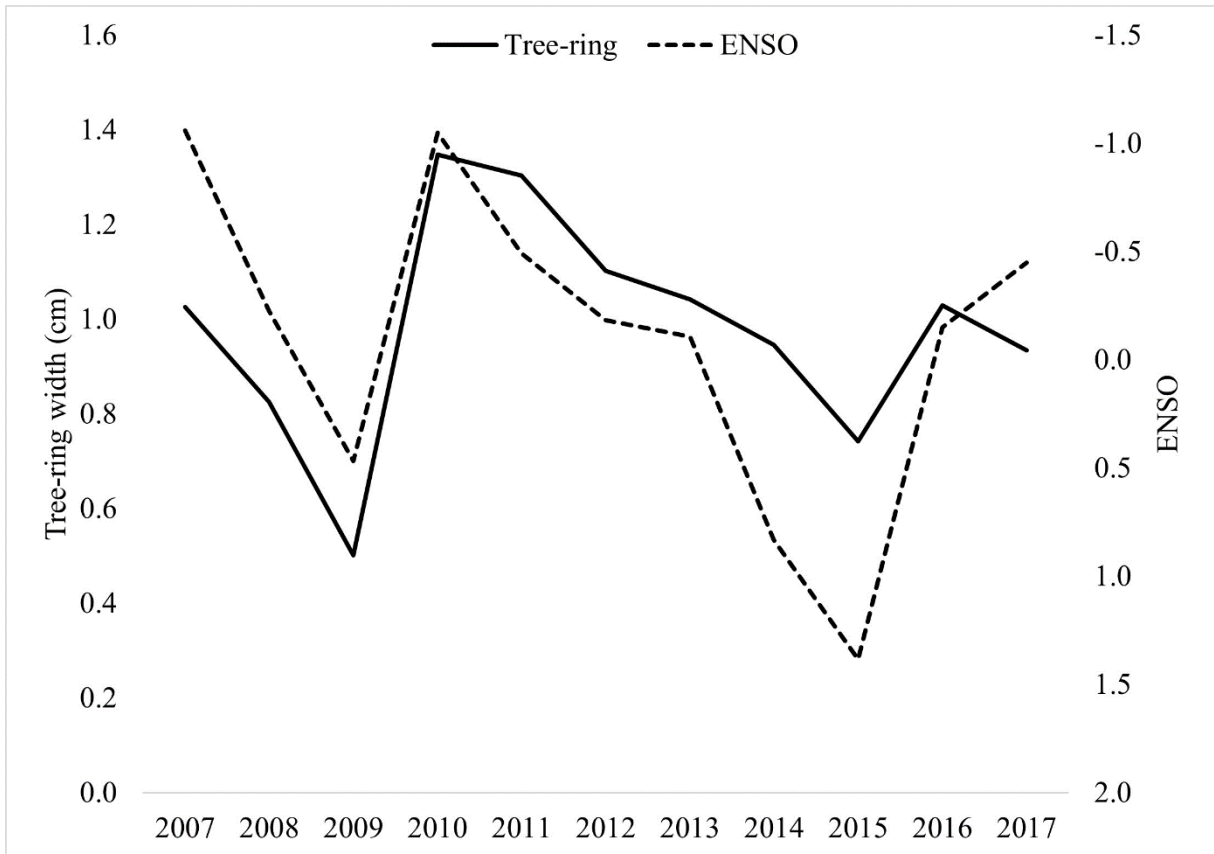
value = 0.037, respectively) (Fig. 5). These results indicate that September (beginning of the rainy season) is a key month for the beginning of the growth period of *T. grandis* in the region.



**Figure 5.** Correlations between climatic variables and Length of growing season of *Tectona grandis*. Dashed lines identify the 95 % confidence limits. Black and gray bars identify the prior and current growth periods, respectively.

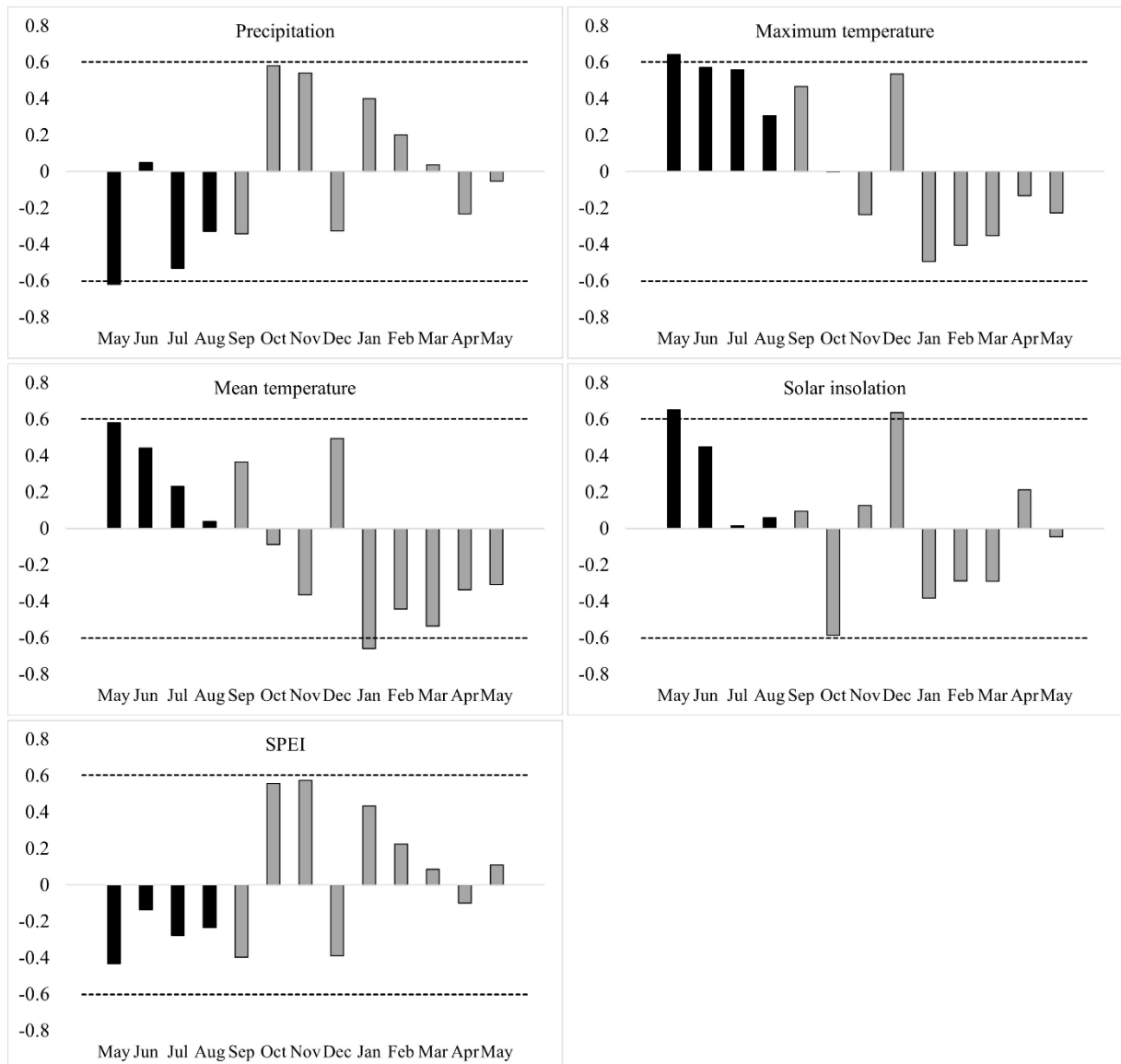
### 3.2 Effect of Climatic Variables on Tree-ring Width

ENSO was negatively correlated with tree-ring width for the current period ( $r = -0.647$ ,  $p$ -value = 0.031) (Fig. 6), highlighting that in the occurrence of a strong increase in the sea surface temperature of the tropical Pacific Ocean, *T. grandis* ring width reduced. For the prior period, the correlation was not significant ( $r = -0.051$ ,  $p$ -value = 0.889).



**Figure 6.** Tree ring width of *Tectona grandis* and El Niño – Southern Oscillation.

During the current growth period, precipitation, maximum temperature, and SPEI were not correlated with tree-ring width. However, tree-ring width was more strongly positively correlated with solar insolation in December ( $r = 0.636$ ,  $p\text{-value} = 0.035$ ) and negatively correlated with mean temperature in January ( $r = -0.660$ ,  $p\text{-value} = 0.034$ ) (Fig. 7). Our findings showed that the largest correlations occurred in the months at the beginning of the rainy season.



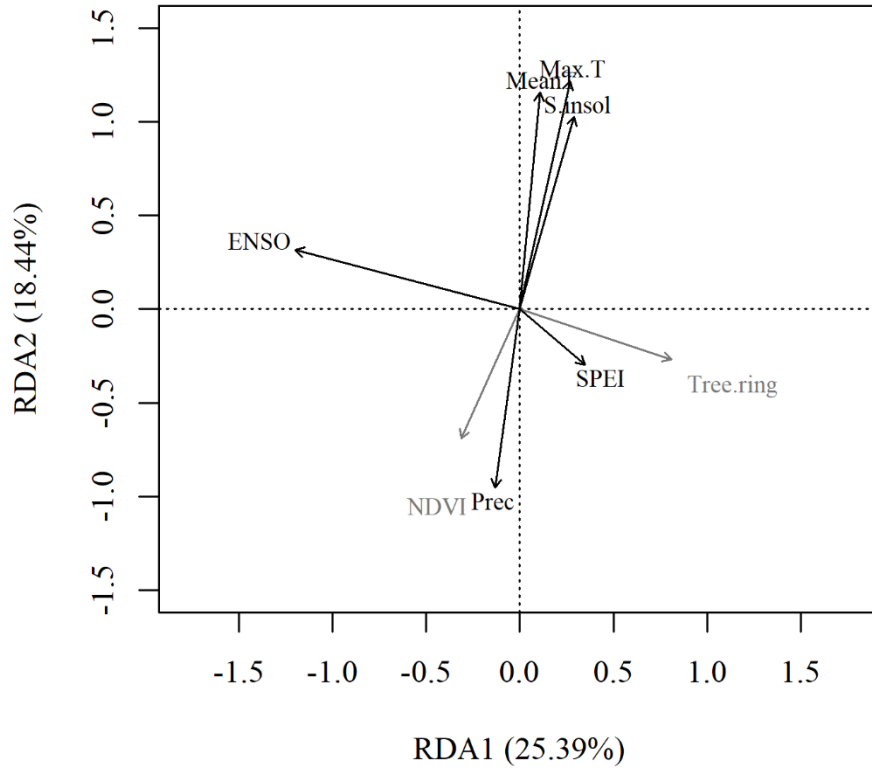
**Figure 7.** Correlations between climatic variables and tree-ring width of *Tectona grandis*. Dashed lines identify the 95 % confidence limits. Black and gray bars identify the prior and current growth periods, respectively.

In prior periods, climatic variables (local) were significantly correlated with tree-ring width in May. Precipitation was negatively correlated ( $r = -0.619$ ,  $p\text{-value} = 0.050$ ), and the maximum temperature and solar insolation were positively correlated with tree-ring width ( $r = 0.643$ ,  $p\text{-value} = 0.048$ ; and  $r = 0.651$ ,  $p\text{-value} = 0.041$ , respectively) (Fig. 7). These findings suggest that the increase in precipitation and decrease in solar insolation and maximum temperature in May of the prior period reduced tree-ring width during the current growth period.

### 3.3 Effect of Climatic Variables on Phenological Metrics and Tree-ring Width

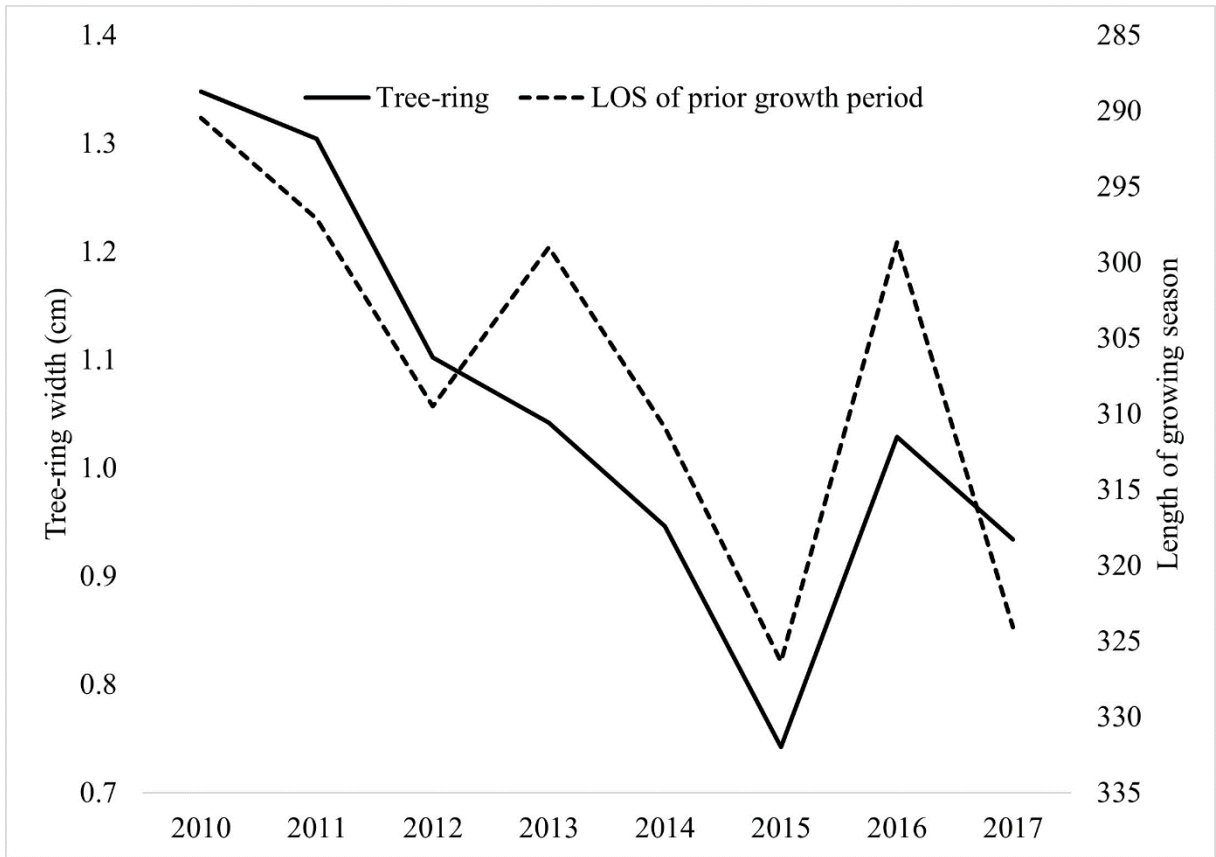
Multivariate RDA showed a significant association ( $p = 0.001$ ) between climatic and growth variables. RDA 1 and 2 accounted for 43.83 % of the data variability (Fig. 8). It also shows that tree-ring width is negatively correlated with ENSO, and to a smaller extent, is positively associated with SPEI. The results also showed that NDVI is positively correlated with precipitation, negatively correlated with solar insolation, and maximum and mean

temperature and almost orthogonal with tree-ring width. These results demonstrate the influence that climatic variables might have on teak phenology.



**Figure 8.** Ordination diagram of the redundancy analysis between NDVI and tree-ring width of *Tectona grandis* and climatic variables.

As previously demonstrated, both the LOS and tree-ring width were influenced by the El Niño event. However, the correlation between these parameters was not significant ( $r = 0.263$ ,  $p$ -value = 0.494) for the current growth period. However, a correlation of -0.851 ( $p$ -value = 0.007) (Fig. 9) was observed for the prior growth period.



**Figure 9.** Tree-ring width and Length of growing season (days) of *Tectona grandis* for prior growth period.

These results showed that LOS influences tree-ring width during the prior growth period. Nevertheless, during the El Niño event, the reduction in tree-ring width was greater than in other periods (Fig. 9), indicating the influence of the event on the teak ring width during the current growth period.

## 4 DISCUSSION

This study demonstrated the relationship between climate and growth of teak trees in the Amazon region from the perspective of climate change, which has triggered years of atypical drought in the region. El Niño events are related to global atmospheric oscillations, and their effects are more pronounced in some regions. At locations where climatic variables are less influenced by these events *T. grandis* ring width is not affected by these fluctuations (DIÉ et al., 2015).

Our results indicate the significant impact of the 2015/2016 El Niño event on the LOS of teak trees in the Amazon region, as reported in other studies (DIÊM et al., 2018). Thus, during El Niño events there is indication that the growth period of teak trees was reduced. The event reduced the total precipitation and increased the mean temperature during the period. Such variables are known to influence the development of teak trees. Variations in cumulative precipitation and length of the rainy season influence the phenological metrics of teak trees, such as LOS (GHOSH et al., 2019), and consequently the tree-ring width. Our findings suggest that these climatic variables are the main drivers of teak phenology (DIÊM et al., 2016).

Additionally, the rainy season in September affected the beginning of the growth period. *T. grandis* responds positively to the first rains by producing new leaves (TANAKA et al., 2015). One of the main factors associated is water availability in shallow soil horizons, which is taken up by superficial roots. Deep roots may improve resilience to inter and intra-seasonal drought events (CLÉMENT et al., 2019).

El Niño event also negatively affected the tree-ring width during the current growth period. Thus, the tree-ring width of species sensitive to moisture, such as teak, can indicate drought during the El Niño events (BORGAONKAR et al., 2010). Tree-ring studies have shown positive correlations between drought index and tree-ring width (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2016; VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2018; FONTANA et al., 2018; ISLAM et al., 2019). Our findings agree with those studies, indicating that greater availability of water favors an increase in teak ring width.

The association of climatic variables with length of season and tree-ring width in the prior period indicated that the prolongation of favorable growth conditions (e.g., increased precipitation and SPEI, and decreased maximum temperature and solar insolation) also influenced the growth of teak during the next growth season. This could be related to the semideciduous phenology of teak trees. Favorable conditions may extend the canopy vegetative period and trigger physiological imbalance in teak trees during the next growing season (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2016). The main function of the process of leaf drop is the recovery of nutrients before leaves detach from the perennial organs of the plant. The extent of LOS for the prior period could induce leaf drop before the completion of nutrient resorption that reduces the nutrients reserves that support growth for the current growth season (FRACHEBOUD et al., 2009; ESTIARTE & PEÑUELAS, 2015).

In addition, during the current growth period, solar insolation influenced *T. grandis* growth. The negative correlations between this climatic variable and tree-ring width and phenological metrics in October and September, respectively, may be related to variations in cloud cover. The greater the solar insolation at the beginning of the growth period, the lower was the precipitation (CAMPOS & ALCANTARA, 2016). Thus, the production of new leaves is delayed, and the growth is reduced. Furthermore, higher insolation leads to elevated leaf temperatures that can affect productivity both directly, by negatively affecting photosynthesis, reducing carbon gain, and causing irreversible thermal damage (FAUSET et al., 2018), and indirectly, by increasing vapor pressure deficit that reduces stomatal conductance and hence inhibits carbon assimilation (LLOYD & FARQUHAR, 2008).



Water may be the growth-limiting resource in the region during the beginning of the rainy season. For example, in December, the solar insolation was positively correlated with tree-ring width. However, during this month, there was greater water availability and leaf density. Thus, greater solar insolation/radiation on leaves favors high photosynthetic activity (TAIZ et al., 2017). In addition, higher soil moisture allows the plant to carry out the transpiration process, and this loss of water is an important cooling mechanism for the leaves and may mitigate the negative impacts of solar radiation on tree growth under dry conditions (TAIZ et al., 2017).

Thus, our study showed the influence of climate variables on *T. grandis* growth and the effect these changes have on its physiology. Understanding forest phenological metrics is of the utmost importance while studying the responses of plant functions in changing environments (GHOSH et al., 2019). The correlations between phenological metrics and climatic variables and tree-ring widths observed in this study showed the sensitivity of teak to climatic changes during the early years of development and demonstrated the potential of using remote sensing techniques combined with methods for extraction of phenological metrics to predict the growth of teak.

However, the lack of correlation between LOS and tree-ring width during the current growth period may reflect the manner in which the plant performs radiation absorption and carbon allocation (BERNER et al., 2011). This could be explained by the way in which the plant, during the leaf period, allocates resources differently in certain situations (VICENTE-SERRANO et al., 2016). During photosynthesis, a smaller fraction is retained in the form of non-structural carbohydrates (NSC) (VILALTA et al., 2016). NSCs have been viewed as a reservoir pool to supply carbon for growth and respiration (DIETZE et al., 2014). Studies have shown that for deciduous species, an increase in total NSC in wood was associated with a decrease in radial growth before leaf shedding as a response to environment changes in different growing seasons, thus allowing the plant to maintain equal growth and NSC dynamics during years with variations in water availability and solar radiation (SCARTAZZA et al., 2013). Moreover, trees can use NSC reserves assimilated during the previous growth season during later periods (DIETZE et al., 2014). Thus, future studies considering the dynamics of NSC combined with the techniques covered in this study are important to understand how this allocation occurs on *T. grandis* in response to climate change, as the intensity and frequency of El Niño events are expected to increase.

## **5 ACKNOWLEDGEMENTS**

This research was partly funded by Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Finance Code 001.

## 6 REFERENCES

- ACEITUNO, P. On the functioning of the Southern Oscillation in the South American Sector. Part I: surface climate. **Monthly Weather Review**. v. 116, p.505-524, 1988.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, p. 711-728, 2013.
- BARKA, I. et al. Suitability of MODIS-based NDVI index for forest monitoring and its seasonal applications in Central Europe. **Central European Forestry Journal**. v. 65, p. 206-217, 2019.
- BEGUERÍA, S.; VICENTE-SERRANO, S. M. **Package 'SPEI': Calculation of the standardized Precipitation-Evapotranspiration Index**. R package version 1.7. 2017. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=SPEI>. 2020.
- BERNER, L. T. et al. High-latitude tree growth and satellite vegetation indices: Correlations and trends in Russia and Canada (1982-2008). **Journal of Geophysical Research**. v. 116, G01015, 2011. doi: 10.1029/2010JG001475
- BHUYAN, U. et al. Exploring relationships among tree-ring growth, climate variability and seasonal leaf activity on varying timescales and spatial resolutions. **Remote Sensing**. v. 9, n. 526, 2017. doi:10.3390/rs9060526
- BORGAONKAR, H. P. et al. El Niño related monsoon drought signals in 523-year-long ring width records of teak (*Tectona grandis* L.F.) trees from south India. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**. v. 285, p. 74-84, 2010.
- BUSETTO, L.; RANGHETTI, L. MODISStsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. **Computers & Geosciences**. v. 97, p. 40-48, 2016.
- CAMPOS, M. S.; ALCANTARA, L. D. S. Interpretação dos efeitos de tempo nublado e chuvoso sobre a radiação solar em Belém/PA para uso em sistemas fotovoltaicos. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 31, p. 570-579, 2016.
- CHEN, J. et al. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. **Remote Sensing of Environment**. v. 91, p. 332-344, 2004.
- CLÉMENT, C. et al. Linking tree-rooting profiles to leaf phenology: a first attempt on *Tectona grandis* Linn F. **Trees**. v. 33, p. 1491-1504, 2019.
- COLLINS, M. et al. The impact of global warming on the tropical Pacific Ocean and El Niño. **Nature Geoscience**. v. 3, p. 391-397, 2010.
- COOK, E. R.; HOLMES, R. L. Guide for computer program ARSTAN. In: GRISSINO-MAYER, H. D.; HOLMES, R. L.; FRITTS, H. C. (eds.) **The international tree-ring data bank program library version 2.0 user's manual**. Tucson, Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona. p. 75-87, 1996.

DIÉ, A. et al. Tree rings show a different climatic response in a managed and non-managed plantation of teak (*Tectona grandis*) in West Africa. **IAWA Journal**. v. 36, p. 409-427, 2015.

DIÊM, P. K. et al. **Teak plantation phenology changes and its relationships to climate variability in Lampang Province, North Thailand**. Proceedings of the International Conference on Climate Change, Biodiversity and Ecosystem Services for the Sustainable Development Goals: Policy and Practice. p. 274-282, 2016.

DIÊM, P. K. et al. Shifts in growing season of tropical deciduous forests as driven by El Niño and La Niña during 2001-2016. **Forests**. v. 9, n. 448, 2018. doi: 10.3390/f9080448

DIETZE, M. C. et al. Nonstructural carbon in woody plants. **Annual Review of Plant Biology**. v. 65, p. 667-687, 2014.

EKLUNDH, L.; JÖNSSON, P. **TIMESAT 3.3 with seasonal trend decomposition and parallel processing: Software Manual**. 2017.

ESTIARTE, M.; PEÑUELAS, J. Alteration of the phenology of leaf senescence and fall in winter deciduous species by climate change: effects on nutrient proficiency. **Global Change Biology**. v. 21, p. 1005-1017, 2015.

FAUSET, S. et al. Differences in leaf thermoregulation and water use strategies between three co-occurring Atlantic Forest tree species. **Plant, Cell & Environment**. v. 41, p. 1618-1631, 2018.

FOLEY, J. A. et al. El Niño–Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**. v. 16, n. 1132, 2002. doi: 10.1029/2002GB001872

FONTANA, C. et al. Climatic signal in growth-rings of *Copaifera lucens*: An endemic species of a Brazilian Atlantic Forest hotspot, southeastern Brazil. **Dendrochronologia**. v. 50, p. 23-32, 2018.

FRACHEBOUD, Y. et al. The control of autumn senescence in European Aspen. **Plant Physiology**. v. 149, p. 1982-1991, 2009.

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

GHOSH, S. et al. Are phenological variations in natural teak (*Tectona grandis*) forests of India governed by rainfall? A remote sensing based investigation. **Environmental Monitoring and Assessment**. v. 191, n. 786, 2019. doi: 10.1007/s10661-019-7680-0

HAM, Y. G. El Niño events will intensify under global warming. **Nature**. v. 564, p. 192-193, 2018.

HEUMANN, B. W. et al. AVHRR derived phenological change in the Sahel and Soudan, Africa, 1982-2005. **Remote Sensing of Environment**. v. 108, p. 385-392, 2007.

HOLMES, R. L. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. **Tree-Ring Bulletin**. v. 43, p. 69-78, 1983.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: Synthesis Report**. Geneva, Switzerland. 2014.

ISLAM, M.; RAHMAN, M.; BRÄUNING, A. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. **Dendrochronologia**. v. 53, p. 63-72, 2019.

JIMÉNEZ, J. A. G. Dendrocronología en el trópico: aplicaciones actuales y potenciales. **Colombia Forestal**. v. 14, p. 97-111, 2011.

LARSSON, L. **Cybis CooRecord**. Cybis Elektronik & Data AB. 2014. <http://www.cybis.se>. 14 Oct. 2020.

LLOYD, J.; FARQUHAR, G. D. Effects of rising temperatures and [CO<sub>2</sub>] on the physiology of tropical forest trees. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**. v. 363, p. 1811-1817, 2008.

LOPES, M. N. G.; SOUZA, E. B.; FERREIRA, D. B. S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 12, p. 84-102, 2013.

LUMYAI, P.; DUANGSATHAPORN, K. Climate reconstruction on the growth of teak in Umphang wildlife sanctuary, Thailand. **Environment and Natural Resources Journal**. v. 16, p. 21-30, 2018.

MOURA, M. M. et al. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of the Total Environment**. v. 651, p. 1639-1651, 2019.

NHONGO, E. J. S. et al. Caracterização fenológica da cobertura vegetal com base em série temporal NDVI/MODIS na reserva do Niassa – Moçambique. **Revista Brasileira de Cartografia**. v. 69, p. 1175-1187, 2017.

OKSANEN, J. et al. **Vegan: Community ecology package**. R package version 2.5-7. 2019. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.

PELISSARI, A. L. et al. A. Cultivo da teca: Características da espécie para implantação e condução de povoamentos florestais. **Agrarian Academy**. v. 1, p. 127-145, 2014.

R Development Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. 2020. Disponível em: <http://www.R-project.org>.

SCARTAZZA, A. et al. Seasonal and inter-annual dynamics of growth, non-structural carbohydrates and C stable isotopes in a Mediterranean beech forest. **Tree Physiology**. v. 33, p. 730-742, 2013.

SOUZA, R. S. et al. Anatomical characteristics of *Tectona grandis* L.f. from different sites in Mato Grosso state. **Ciência Florestal**. v. 29, p. 1528-1537, 2019.

- SPEER, J. H. **Fundamentals of tree-ring research**. Tucson, University of Arizona Press. 2012.
- TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6th ed. Porto Alegre, Artmed. 2017.
- TANAKA, K. et al. Earlier leaf flush associated with increased teak defoliation. **Forest Science**. v. 61, p. 1009-1020, 2015.
- VENEGAS-GONZÁLEZ, A. et al. Sensitivity of tree ring growth to local and large-scale climate variability in a region of Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**. v. 123, p. 233-245, 2016.
- VENEGAS-GONZÁLEZ, A. et al. Drought and climate change incidence on hotspot Cedrela forests from the Mata Atlântica biome in southeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**. v. 15, e00408, 2018. doi: 10.1016/j.gecco.2018.e00408
- VICENTE-SERRANO, S. M.; BEGUERÍA, S.; LÓPEZ-MORENO, J. I. A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. **Journal of Climate**. v. 23, p. 1696-1718, 2010.
- VICENTE-SERRANO, S. M. et al. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at global scale. **Remote Sensing of Environment**. v. 187, p. 14-29, 2016.
- VILALTA, J. M. et al. Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: a global synthesis. **Ecological Monographs**. v. 86, p. 495-516, 2016.
- YU, L. et al. Monitoring the long-term vegetation phenology change in Northeast China from 1982 to 2015. **Scientific Reports**. v. 7, p. 14770, 2017. doi: 10.1038/s41598-017-14918-4
- ZAW, Z. et al. Drought reconstruction over the past two centuries in southern Myanmar using teak tree-rings: linkages to the Pacific and Indian Oceans. **Geophysical Research Letters**. v. 47, e2020GL087627, 2020. doi: 10.1029/2020GL087627
- ZENG, L. et al. A review of vegetation phenological metrics extraction using time-series, multispectral satellite data. **Remote Sensing of Environment**. v. 237, n. 111511, 2020. doi: 10.1016/j.rse.2019.111511

## **CAPÍTULO II**

### **CARACTERÍSTICAS DA MADEIRA DE *Tectona grandis* Linn F. DURANTE A SECA DO EVENTO EL NIÑO 2015/2016 NA AMAZÔNIA**

## RESUMO

Pesquisas têm apontado que a ocorrência de eventos climáticos extremos pode intensificar nos próximos anos. Regiões como a Amazônia sofrem influência desses eventos como exemplo o El Niño, responsável pela redução da precipitação e aumento da temperatura. Pouco se sabe sob os efeitos desse evento na dinâmica de formação das árvores dessa região. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do clima local (precipitação, temperatura máxima e insolação) e de larga escala (El Niño) nas características da madeira de *Tectona grandis* Linn f. em plantios na Amazônia. Foram retirados discos da base de árvores de teca com 12 anos de idade, utilizadas para análises anatômica e física da madeira nos períodos pré-El Niño (2012/2013), El Niño (2014/2015) e pós-El Niño (2016/2017). A densidade e características dos vasos e raios foram comparadas com variáveis climáticas locais (precipitação, temperatura máxima e insolação) e de larga escala (ENOS). Nossos resultados demonstraram que o período de ocorrência do evento de El Niño afetou as dimensões dos elementos de vaso da espécie, sendo a precipitação em alguns meses do ano, responsável pelo aumento das dimensões dos elementos de vaso e da densidade aparente da madeira. Evidenciou-se também os efeitos negativos da temperatura nas dimensões dos elementos anatômicos e que o efeito da insolação é dependente da quantidade de água disponível no solo. Portanto, nossos resultados demonstram a aclimatação da espécie ao evento climático El Niño e pode servir como impulsionamento para novos estudos em outras localidades e com outras idades para melhorar a compreensão sobre as respostas da árvore às mudanças climáticas.

**Palavras-chave:** Anatomia da madeira, perfil de densidade, mudanças climáticas, teca



## ABSTRACT

Research has pointed out that the occurrence of extreme weather events may intensify in the next years. Regions such as the Amazon are influenced by these events such as El Niño, responsible for reducing precipitation and increasing temperature. Little is known about the effects of this event on the tree dynamics in this region. The objective of this work was to evaluate the effect of local (precipitation, maximum temperature, and insolation) and large-scale (El Niño) climate on the wood characteristics of *Tectona grandis* Linn f. in plantations in the Amazon. Discs were removed from the base of teak trees at the age of 12, used for anatomical and physical analyses of wood in the pre-El Niño (2012/2013), El Niño (2014/2015) and post-El Niño (2016/2017) periods. The wood density and the characteristics of vessels and rays were compared with local (precipitation, maximum temperature, and insolation) and large-scale (ENSO) climatic variables. Our results showed that the period of occurrence of the El Niño event affected the vessel dimensions of the species. The precipitation, in some months of the year, was responsible for an increase in vessel dimensions and in apparent density of wood. It was also showed the negative effects of temperature on the dimensions of the anatomical elements and that the effect of insolation is dependent on the amount of water available in the soil. Thus, our results demonstrate the acclimatization of the species to the El Niño climatic event and can serve as a boost for further studies in other locations and with other ages to improve understanding of the tree's responses to climate change.

**Keywords:** Wood anatomy, density profile, climate change, teak

## 1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior floresta tropical do mundo, caracterizada pelo clima úmido e quente (BRITANNICA, 2019). Devido a sua extensão, várias classificações climáticas são encontradas em seu território. A porção sudeste do estado do Pará, por exemplo, apresenta estações bem definidas ao longo do ano, com ocorrência de períodos de seca (ALVARES et al., 2013). Tal característica faz com que ocorram flutuações na quantidade de água presente no solo e que isso influencie na dinâmica das árvores. Nessas áreas, o câmbio vascular não fica ativo durante todo o ano, já que a taxa e duração de cada uma das fases da xilogênese é altamente dependente do clima, fazendo com que ocorram variações na anatomia da madeira dentro do anel de crescimento (DE MICCO et al., 2019).

Neste contexto, diversos estudos têm apontado efeitos significativos das flutuações anuais do clima na anatomia da madeira (OLANO et al., 2013; CASTAGNERI et al., 2017; RODRÍGUEZ-RAMÍREZ et al., 2020; HONG et al., 2021). Em alguns casos, a morfologia das células do xilema se mostrou mais sensível à essas flutuações anuais do clima do que a largura dos anéis de crescimento, demonstrando o potencial de utilização da anatomia em estudos dendroecológicos (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2015).

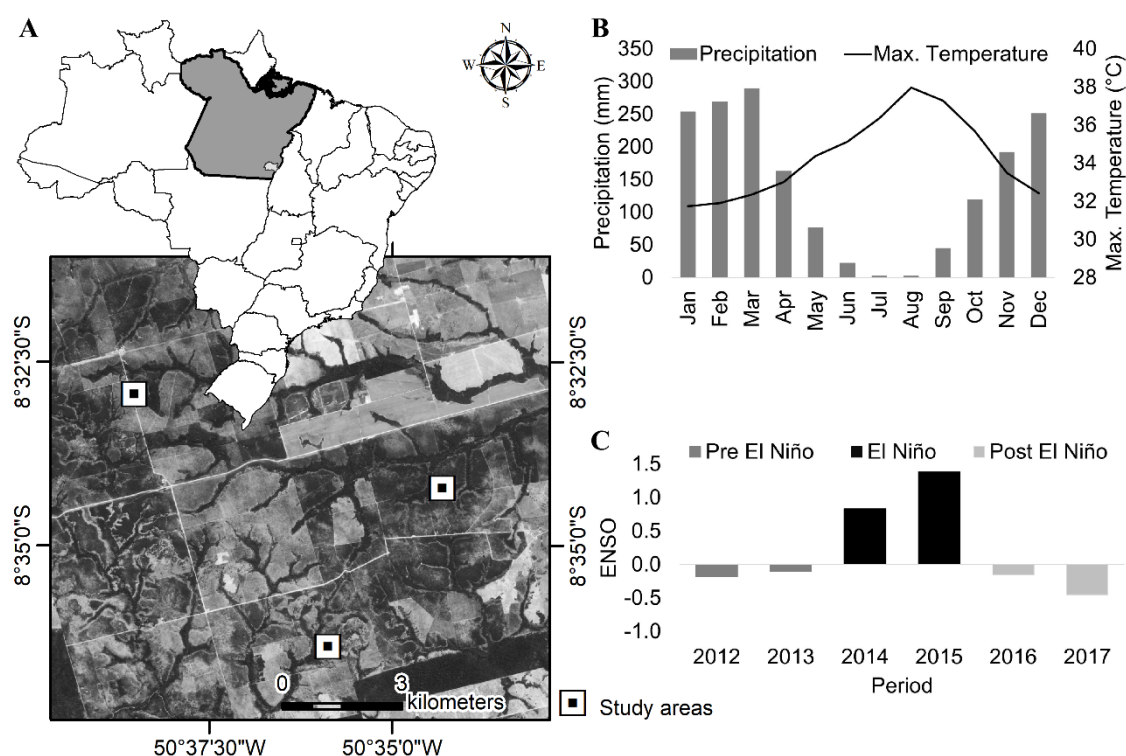
Em locais sob influência de eventos climáticos de larga escala, como exemplo o El Niño (ENOS), essas variações na anatomia e no crescimento das árvores têm a tendência de serem intensificadas (BALANZATEGUI et al., 2021; PALOMO-KUMUL et al., 2021; MENEZES et al., 2022), podendo causar prejuízos na qualidade e produtividade destas. O evento El Niño é um fenômeno atmosférico-oceânico que faz com que a temperatura das águas superficiais do oceano pacífico tropical central e oriental se torne mais alta que o normal, fazendo com que ocorram flutuações climáticas em escala global (FAO, 2014). Na Amazônia, o evento é caracterizado principalmente pela redução da precipitação e por um pequeno aumento da temperatura, afetando assim os padrões espacial e sazonal da dinâmica ecológica (BARBOSA et al., 2019). Tais flutuações, como já mencionado, podem intensificar variações na anatomia e produtividade das árvores, podendo causar prejuízos tanto na qualidade quanto na produtividade da madeira, sendo, portanto, importante estudá-las para entender a dinâmica das árvores frente à essas variações. Os efeitos desses eventos na dinâmica das árvores são melhor compreendidos quando estudadas espécies que demarcam essas alterações do clima nos anéis de crescimento, como exemplo a *Tectona grandis* Linn f. (ZAW et al., 2020; UPADHYAY et al., 2021).

A teca é uma espécie arbórea originária da Ásia, que perde parcial ou totalmente as folhas durante períodos do ano que não são favoráveis ao seu crescimento (baixa disponibilidade de água no solo, por exemplo) e que responde às primeiras chuvas, produzindo rapidamente novas folhas e retomando o crescimento em altura e diâmetro (MACEDO et al., 2007; CARMO et al., 2022). Possui porosidade em anel semi-poroso, com poros visíveis a olho nu, alguns obstruídos por tilose, com a demarcação das camadas de crescimento distinta pela variação do diâmetro do lume do elemento de vaso e por faixas do parênquima marginal; os raios são multisseriados e homogêneos, com todas as células do raio procumbentes (SOUZA et al., 2019). Tais características favorecem a utilização da espécie para estudos sobre o clima. Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o efeito do clima local (precipitação, temperatura máxima e insolação) e de larga escala (El Niño), ocorrido nos anos de 2015/2016, na anatomia e densidade da madeira de *Tectona* provenientes de plantios localizados na Amazônia.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

Foram utilizadas árvores de *Tectona grandis* Linn F., com 12 anos de idade, de plantios localizados na região sudeste do estado do Pará (Figura 10). As árvores amostradas eram de um clone comercial, implantados no ano de 2007, com espaçamentos dos plantios variando entre 4,0 x 4,0 m e 4,0 x 3,0 m. O clima, de acordo com a classificação climática de Koppën, é Tropical Aw, com temperaturas médias nos meses mais quente e frio do ano de 22 e 18 °C, respectivamente (ALVARES et al., 2013). O solo, segundo a classificação da Embrapa, é PVA d - Argissolo Vermelho Amarelos Distróficos (EMBRAPA SOLOS, 2020).



**Figura 10.** Mapa com a localização geográfica dos plantios de *Tectona grandis* (A), dados médios mensais de precipitação acumulada e temperatura máxima (B) e médias do índice Niño oceânico (C) entre os períodos 2012 a 2017.

Novas árvores foram amostradas de forma destrutiva para retirada de um disco da base, utilizado para as análises densitométrica e anatômica. Como a região apresenta baixos índices de precipitação nos meses de junho a agosto (LOPES et al., 2013) (Figura 10), consideramos a janela de crescimento da espécie de setembro (início do período chuvoso) a agosto (final do período de seca). Assim, o anel de crescimento de 2017 iniciou o desenvolvimento em setembro do mesmo ano e terminou em agosto de 2018, por exemplo. Portanto, aqui, quando houver referência a período estão sendo considerados os meses correspondentes à formação do anel de crescimento (setembro a agosto).

### 2.2 Anatomia da madeira

Para quantificação das estruturas anatômicas foram confeccionadas lâminas semipermanentes. Para os cortes histológicos, as amostras radiais foram seccionadas nos planos de corte transversal e longitudinal tangencial em micrótomo de deslize (Micron HM 450), com espessuras entre 14 e 20  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, os cortes foram corados com Safranina (1%). Na

seção transversal quantificou-se as variáveis diâmetro tangencial e radial dos vasos presentes no lenho inicial. Já na seção longitudinal tangencial quantificou-se as variáveis altura e largura dos raios.

Visando a quantificação do comprimento dos elementos de vaso, realizou-se a dissociação da madeira. As amostras, previamente identificadas e cortadas em pequenas lascas no sentido das fibras, foram transferidas para frascos de vidro de 30 ml contendo solução de peróxido de hidrogênio e ácido acético glacial, na proporção de 1:1. Estes, foram lacrados e mantidos em estufa a 70 °C até completar a dissociação. Posteriormente, as fibras foram lavadas com água destilada para remoção do reagente e procedeu-se a montagem das lâminas semipermanentes coradas com Safranina (1%).

Todas as mensurações foram realizadas de acordo com os padrões estabelecidos pela IAWA Committee (1989) e analisadas por meio de microscópio conectado ao software Image Pro-Plus®4.5.0.29. As análises foram realizadas por anel de crescimento (período).

### **2.3 Perfil de densidade da madeira**

De cada um dos nove discos foi retirada uma amostra diametral de aproximadamente 2 x 2 cm (largura e espessura). As amostras foram cortadas na orientação transversal com 2 mm de espessura usando serras circulares duplas. Posteriormente, estas foram acondicionadas em sala climatizada até atingirem a umidade de equilíbrio (aproximadamente 12%).

O perfil de densidade do lenho foi obtido no equipamento QTRS-01X (Quintek Measurement Systems, EUA). O equipamento faz uma varredura sob a superfície transversal da madeira por um feixe de raio-X colimado. As leituras foram feitas a cada 40 µm.

### **2.4 Dados climáticos**

Os dados climáticos mensais de Precipitação Total (mm), Temperatura Máxima (°C), e Insolação Total (horas) foram obtidos da plataforma do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação convencional de Conceição do Araguaia – PA.

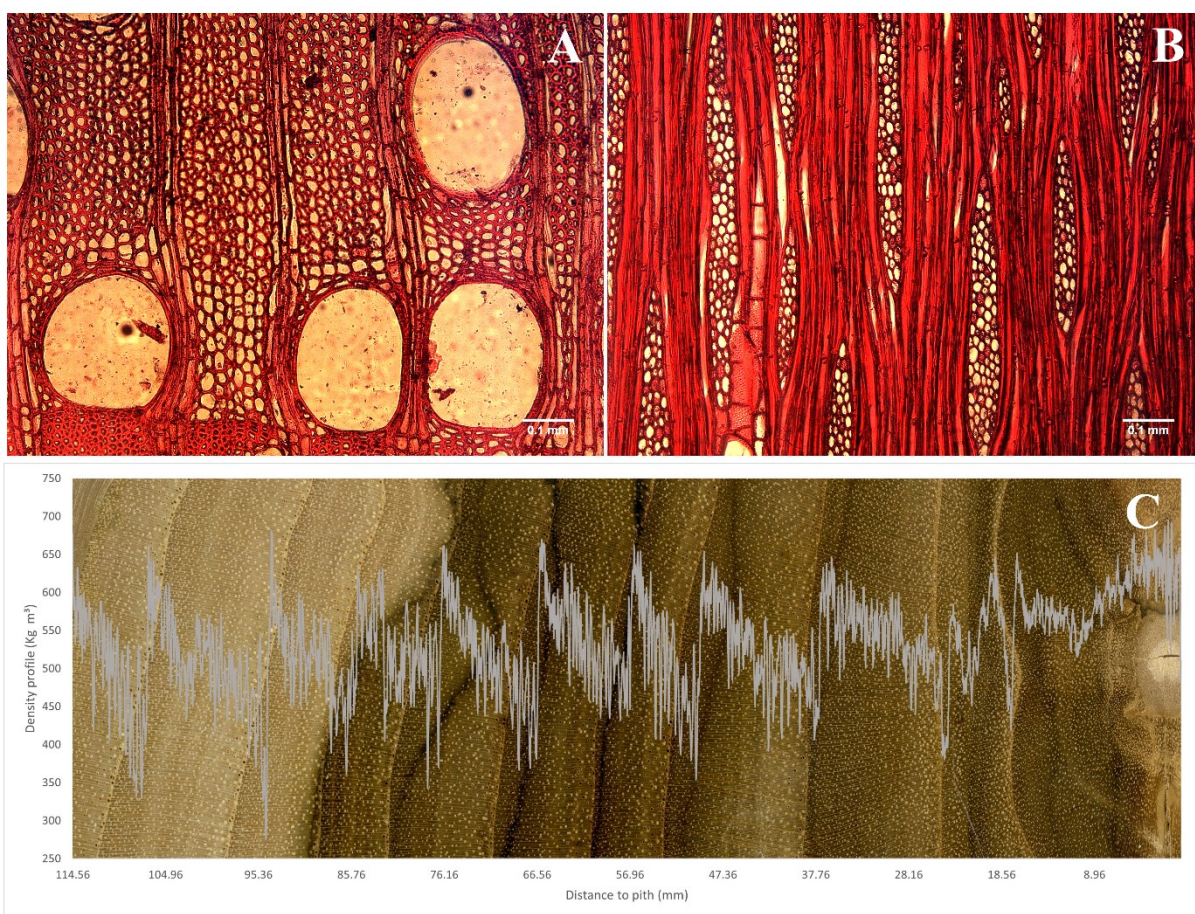
Os dados de variação da temperatura das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Tropical (influência do El Niño) foram adquiridos na plataforma do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Todos os dados climáticos foram adquiridos para os anos entre 2012 e 2018, pois considerou-se o evento de El Niño ocorrido nos anos 2015/2016, que refletiu em uma diminuição da precipitação e aumento da temperatura na região. Avaliou-se, portanto, os períodos pré-El Niño (2012 e 2013), El Niño (2014 e 2015) e pós-El Niño (2016 e 2017) (Figura 10).

### **2.5 Análise dos dados**

A variação nas dimensões dos elementos anatômicos da madeira durante os períodos de 2012 a 2017 foi testada usando análise de variância e teste Scott-Knott ( $\alpha = 0,05$ ). A influência das variáveis climáticas mensais nas características anatômicas e na densidade aparente da madeira foi testada pela análise de correlação de Pearson ( $\alpha = 0,05$ ). Para isso, considerou-se o período anterior (junho a agosto – estação seca) e o período corrente (setembro a maio – estação chuvosa). Foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk ( $\alpha = 0,05$ ) para testar a normalidade dos dados.

### 3 RESULTADOS

A madeira de teca apresentou anéis de crescimento distintos, delimitados por faixas de parênquima marginal e pela variação no diâmetro dos vasos (anéis semi-porosos). Os vasos eram predominantemente solitários e múltiplos radiais de 2 ou 3; seção circular oval; diâmetro tangencial de 0,1245 a 0,3125  $\mu\text{m}$ ; comprimento dos elementos de vasos de 0,098 a 0,422  $\mu\text{m}$ ; placa de perfuração simples (Figura 11A). Os raios eram multisseriados, com 1 a 4 células de largura; altura de 0,043 a 0,859  $\mu\text{m}$ ; largura de 0,032 a 0,087  $\mu\text{m}$  (Figura 11B) e parênquima axial em faixas marginais, paratraqueal escasso e vasicêntrico. O perfil radial de densidade apresentou diferenças marcantes entre os lenhos inicial e tardio. No lenho inicial a densidade foi menor devido ao aumento do diâmetro dos vasos e presença das faixas de parênquima marginal, aumentando de forma gradativa até o limite dos anéis de crescimento (Figura 11C).



**Figura 11.** Anatomia e densidade aparente (casca – medula) da madeira de *Tectona grandis*. A: Seção transversal contendo elementos de vasos, fibras, parênquima axial e raios, sob a lente de 10x; B: Seção longitudinal tangencial evidenciando raios multisseriados, sob a lente de 10x; C: Perfil radial de densidade aparente (obtido por densitometria de raios-x) demonstrando menor densidade nos limites das camadas de crescimento.

Foram observadas diferenças significativas entre os períodos avaliados para quase todas as variáveis anatômicas, exceto para a altura de raio (Tabela 2). A largura e o comprimento do vaso apresentaram aumento ao longo dos períodos, porém, no período 2015 (El Niño) observou-se o menor valor para este elemento, diferindo estatisticamente dos demais, indicando a influência do fenômeno de larga escala nesta variável. Já para a variável largura do raio, os

períodos 2012 e 2016 apresentaram os maiores valores para a variável, diferindo estatisticamente dos demais.

**Tabela 2.** Médias das variáveis anatômicas de *Tectona grandis* entre os períodos de 2012 a 2017.

Variáveis anatômicas (mm)		Período					
		2012	2013	2014	2015	2016	2017
Elemento de vaso	Diâmetro	0,2350 b	0,2364 b	0,2409 a	0,2128 c	0,2418 a	0,2474 a
	Comprimento	0,2702 a	0,2665 a	0,2720 a	0,2290 c	0,2463 b	0,2772 a
Raio	Altura	0,5141 a	0,4928 a	0,5279 a	0,5001 a	0,5213 a	0,5352 a
	Largura	0,0585 a	0,0555 b	0,0553 b	0,0542 b	0,0566 a	0,0539 b

Letras iguais indicam que não houve diferença significativa entre os períodos analisados pelo teste de Scott-Knott ( $\alpha = 0,05$ ).

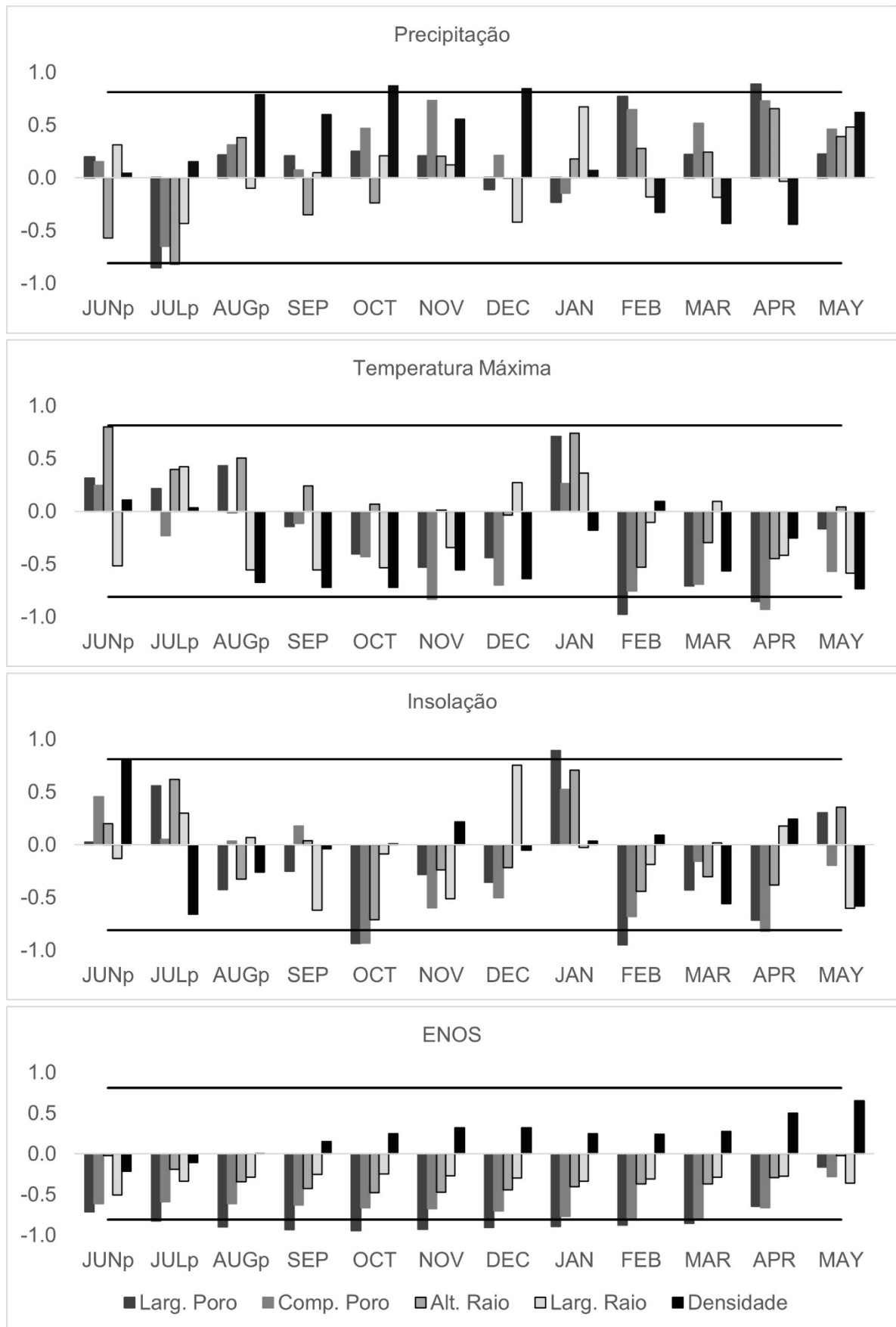
A correlação entre as variáveis climáticas anuais (por período) e as propriedades da madeira foi significativa somente entre precipitação e comprimento do elemento de vaso (Tabela 3). A correlação positiva indica que quanto maior a precipitação anual, maior o comprimento do elemento.

**Tabela 3.** Correlação de Pearson entre as variáveis climáticas e as propriedades da madeira de *Tectona grandis*.

Variável climática	Propriedade madeira				Densidade
	Elemento de vaso		Raio		
	Largura	Comprimento	Altura	Largura	
Precipitação	0,6725	<b>0,9725*</b>	0,3451	0,0924	0,3433
Temperatura máxima	-0,5585	-0,7138	-0,0626	-0,5028	-0,6160
Insolação	-0,8028	-0,8065	-0,2335	-0,5583	-0,0674
ENSO	-0,7723	-0,6180	-0,2998	-0,3465	0,5165

\*correlação significativa ( $\alpha = 0,05$ ).

Analisando as relações entre as variáveis climáticas mensais e as propriedades da madeira, observou-se algumas correlações significativas (Figura 12). Para a variável precipitação, correlações significativas foram encontradas para o diâmetro do vaso, altura do raio e densidade aparente. O diâmetro do vaso, em julho do período prévio, apresentou correlação significativa negativa, ou seja, quanto maior a precipitação neste mês, menor o diâmetro, e em abril do período corrente correlação significativa positiva, ou seja, quanto maior a precipitação neste período, maior o diâmetro. A precipitação de julho do período prévio também apresentou correlação significativa negativa com a altura do raio. Já a densidade da madeira apresentou correlações significativas positivas nos meses de outubro e dezembro do período corrente.



**Figura 12.** Correlações entre as variáveis climáticas e as propriedades da madeira de *Tectona grandis*. As linhas indicam o limite de confiança de 95%.

Para a variável temperatura máxima, correlações significativas foram observadas para o diâmetro e comprimento do vaso. O diâmetro do vaso nos meses de fevereiro e abril do período corrente apresentou correlações negativas. Da mesma forma, o comprimento do vaso apresentou correlações negativas nos meses de novembro e abril do período corrente.

A insolação apresentou correlações significativas com o diâmetro e comprimento do vaso. O diâmetro do vaso no período corrente apresentou correlações negativas nos meses de outubro e fevereiro e positiva no mês de janeiro. Já com o comprimento do vaso apresentou correlações significativas negativas nos meses de outubro e abril do período corrente.

A variável climática de larga escala (ENSO) apresentou correlação significativa somente com o diâmetro do vaso. Nos meses de julho e agosto do período prévio e nos meses de setembro a março do período corrente foram observadas correlações negativas, ou seja, quanto maior o índice ENSO, menor o diâmetro do vaso, indicando a sensibilidade da espécie ao fenômeno climático.



## 4 DISCUSSÕES

A plasticidade fenotípica permite as plantas alterarem sua morfologia, como por exemplo sua anatomia, em resposta ao estresse abiótico, sendo este processo, pelo qual as plantas respondem a mudanças periódicas no ambiente, mediante alteração direta de sua morfologia ou fisiologia, chamado de aclimatação (TAIZ & ZEIGER, 2017). Estudos têm demonstrado a sensibilidade de espécies a essas mudanças, que refletem não só no crescimento como também na anatomia da madeira (ISLAM et al., 2019; RODRÍGUEZ-RAMÍREZ et al., 2020), indicando assim, o potencial de utilização dessas variáveis para estudos sobre o clima.

A *Tectona grandis* é uma espécie que apresenta demarcação dos anéis de crescimento bem definida, muito utilizada em estudos sobre o clima (VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2015; ZAW et al., 2020). Em nosso estudo, foram medidos os parâmetros dos vasos referentes ao lenho inicial por ser a região mais sensível do anel de crescimento às condições ambientais. Já foi demonstrado que o sinal comum, que representa o efeito do clima nos anéis de crescimento, é gradualmente reduzido na transição do lenho inicial para o lenho tardio (BALANZATEGUI et al., 2021). Considerando as variáveis climáticas anuais, a precipitação e o comprimento do vaso foram as únicas variáveis que se correlacionaram significativamente, indicando que em anos com maiores índices de precipitação há um aumento no comprimento do vaso. Saima et al. (2021), também encontraram correlação positiva entre o comprimento do vaso e a precipitação para diversas espécies crescendo em ambientes com gradiente pluviométrico. Segundo estes autores, elementos de vasos curtos são mais vantajosos para minimizar danos caso ocorra cavitação.

Já quando consideradas as variáveis climáticas mensais, a precipitação em abril do período corrente se correlacionou positivamente com o diâmetro do vaso. Venegas-González et al. (2015), avaliando a relação entre a anatomia da madeira de *Tectona grandis* e o clima na região de Piracicaba no estado de São Paulo, Brasil, encontraram a mesma relação nos meses de dezembro e janeiro do período corrente. De acordo com eles, esse aumento no tamanho do vaso está relacionado à disponibilidade hídrica da área, o que permite à árvore explorar a água do solo de forma mais rápida e eficiente para competir com outras árvores. Carlquist & Hoekman (1985), estudando 207 espécies de madeiras do sul da Califórnia, relataram correlação positiva entre a largura do elemento de vaso e a precipitação. Além disso, observaram uma relação inversa entre a largura e a densidade de vaso, que, de acordo com eles, é uma estratégia da planta para ganhar em segurança (menor largura e maior densidade de vaso) ou condutividade (maior largura e menor densidade de vaso).

Ainda considerando a precipitação, correlações negativas foram observadas em julho do período prévio para as variáveis diâmetro do vaso e altura do raio, indicando o efeito negativo da antecipação/prolongamento do período chuvoso na anatomia da madeira. Carmo et al. (2022) observaram que o prolongamento do período chuvoso no período prévio afetou o crescimento e o comprimento do período de crescimento da espécie. Esse prolongamento pode retardar a queda das folhas no período anterior, induzindo a queda das folhas antes da completa realocação dos nutrientes pela planta, prejudicando o crescimento do período corrente, podendo diminuir também as dimensões dos elementos anatômicos. Olano et al. (2013) também observaram correlações negativas entre o número de novos raios formados e a precipitação nos meses de janeiro e fevereiro (inverno), da espécie *Juniperus thurifera*, meses esses que antecedem o período com as melhores condições de crescimento para a espécie (mês de maio) que marca o do início da formação do lenho inicial.

A correlação positiva significativa para a variável precipitação e a densidade aparente nos meses de outubro e dezembro do período corrente indicam que quanto maior a precipitação nesses meses, maior a densidade da madeira. Amoah & Inyong (2019) avaliaram as propriedades físicas, anatômicas e mecânicas de indivíduos de teca com 10, 15 e 20 anos de

idade, de duas localidades, uma seca e outra úmida. Eles observaram maiores médias de densidade aparente (12%) para teca de área úmida, que apresentou também a maior variação de densidade, tanto entre árvores como dentro da árvore. Segundo eles, tal resultado pode ser atribuído à maior proporção de elemento de vaso para a teca de área seca, como uma estratégia da árvore para otimizar a condução de seiva e água, o que explica os menores valores das propriedades mecânicas avaliadas por eles. Almeida et al. (2022) avaliando o clone comercial de *Eucalyptus urophylla* mais plantado no Brasil, observaram maiores densidades da madeira em árvores implantadas em ambientes com maiores índices de precipitação. De acordo com eles, a densidade da madeira não apresentou correlação com o tamanho e a porcentagem de área ocupada pelo elemento de vaso, porém, apresentou correlação negativa com a frequência de vaso, sendo este maior em área mais seca. Da mesma forma, Islam et al. (2019) observaram um aumento de 13% na proporção do elemento de vaso da madeira de *Chukrasia tabularis* A. Juss. no ano de 1999, um dos anos mais secos das últimas décadas da região de Bangladesh. De acordo com eles, esse aumento ocorre como uma estratégia da planta para evitar a perda hidráulica. Estudos têm demonstrado correlação negativa entre essas duas variáveis (CARLQUIST & HOEKMAN, 1985; OLSON et al., 2020), sendo a redução nas dimensões desse elemento comum em ambientes mais secos, pois vasos menores são mais resistentes ao processo de embolismo e, portanto, mais adaptados a ambientes mais secos (CARLQUIST, 1988).

Correlações significativas negativas entre o vaso (diâmetro e comprimento) e a temperatura máxima nos meses do período corrente foram encontradas. Castagneri et al. (2017) avaliando duas espécies do gênero *Quercus*, também decíduas e com porosidade em anel poroso/semi-poroso, observaram efeito negativo da temperatura no tamanho do elemento de vaso no período chuvoso. De acordo com eles, este efeito está relacionado ao impacto negativo no processo fisiológico, diretamente relacionado ao crescimento da árvore, além de que altas temperaturas reduzem a disponibilidade de água necessária para a formação do vaso. Da mesma forma, Hong et al. (2021), avaliando a anatomia da madeira de *Pinus tabuliformis* Carrière, observaram efeito negativo da temperatura dos meses iniciais do período chuvoso (abril e maio) no diâmetro do lume da traqueíde na região do lenho inicial. Venegas-González et al. (2015), encontraram resultados divergentes entre a área do vaso e temperatura nos meses do período corrente para *Tectona grandis*, observando correlações significativas positivas entre estas variáveis, com exceção do mês de maio, que apresentou correlação significativa negativa. Já Matisons et al. (2019), avaliando cinco procedências de *Pinus sylvestris* L. em três localidades da Letônia, observaram influência da temperatura nos meses de fevereiro, abril e junho do período corrente na área da seção transversal do lume das traqueídes do lenho inicial. No entanto, essa influência variou entre as procedências e os locais, sendo positivas para algumas e negativas para outras, indicando a variabilidade na adaptabilidade da arquitetura hidráulica da madeira e a maior tolerância de algumas a flutuações e extremos ambientais.

Com relação a insolação, correlações significativas foram encontradas com a anatomia. A insolação está diretamente relacionada com a quantidade de radiação solar que chega nas folhas das plantas para realização da fotossíntese. Essa radiação é absorvida pelas folhas, por meio da abertura estomática e, portanto, é dependente também da disponibilidade hídrica do local. A abertura estomática favorece a perda de água e, assim, se o suprimento de água é abundante, é vantajoso para a planta trocar a água por produtos da fotossíntese, para crescimento e reprodução (MEINZER et al., 2008; TAIZ & ZEIGER, 2017). As correlações significativas negativas para o mês de outubro (início do período chuvoso) para as variáveis diâmetro e comprimento do vaso observadas em nosso estudo podem estar relacionadas com a baixa disponibilidade hídrica, sendo a água o fator limitante do crescimento nesse período (CARMO et al., 2022). Com o decorrer do período chuvoso há aumento da disponibilidade hídrica para planta, favorecendo a realização da fotossíntese, o que pode justificar a correlação

positiva observada entre a insolação e o diâmetro do vaso no mês de janeiro. No entanto, as correlações negativas para a largura e comprimento do elemento de vaso em fevereiro e abril, respectivamente, não seguiram o mesmo padrão.

O índice do evento climático de larga escala (ENSO), apresentou sensibilidade na anatomia da espécie somente com a variável diâmetro do vaso. A influência do evento de El Niño foi a mais extrema do século 21, com 43% do bioma Amazônia apresentando anomalias nos padrões de déficits cumulativos máximos de água (ARAGÃO et al., 2018), sendo este e outros eventos climáticos extremos responsáveis por alterações na anatomia da madeira (ISLAM et al., 2019; RODRÍGUEZ-RAMÍREZ et al., 2020). Isso é corroborado pela tendência que foi observada no aumento do diâmetro do vaso ao longo dos anos, com redução no período 2015 e aumento nos períodos pós-El Niño. Segundo Anish et al. (2015), a teca possui tendência de aumento na largura do elemento de vaso com a idade do material, confirmando que a redução encontrada no período de 2015 é resultado da influência do El Niño nos fatores climáticos da região.

Árvores jovens, como o material utilizado nesse estudo, são mais sensíveis às mudanças climáticas. O processo de limitação fisiológica modifica-se ao longo da maturação da árvore (raízes mais profundas nas árvores mais velhas diminuem sua limitação na interface planta-solo), vez que a maior resistência à seca pode ser relacionada a densidade da madeira e, conseqüentemente maior capacidade de acúmulo de água (maior conteúdo de água relativo) (BRETFFELD et al., 2018; PALOMO-KUMUL et al., 2021).

## 5 CONCLUSÕES

O estudo demonstrou o efeito do clima nas características da madeira de *Tectona grandis* Linn f. Os resultados evidenciaram que a seca provocada pelo forte evento de El Niño de 2015/2016 promoveu uma redução nas dimensões dos elementos de vaso da espécie, indicando a adaptação desta às flutuações do clima da região. Além disso, demonstrou-se que maiores índices de precipitação nos meses de outubro e dezembro do período corrente aumentaram a densidade da madeira da espécie. Ainda, foi evidenciado que a antecipação/prolongamento da precipitação no período prévio afetou a anatomia da espécie.

Assim, mostrou a importância de se considerar o efeito de eventos climáticos na dinâmica de plantios florestais na Amazônia. Com as mudanças climáticas esses eventos tendem a aumentar em intensidade e duração, sendo necessário o entendimento de como estes afetam/afetarão o desenvolvimento das árvores.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, M. N. F. et al. Differences in wood anatomy and chemistry of a *Eucalyptus urophylla* clone explained by site climate conditions. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 52, n. 5, p. 834-844, 2022.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.
- AMOAH, M., INYONG, S. Comparison of some physical, mechanical and anatomical properties of smallholder plantation teak (*Tectona grandis* Linn. f.) from dry and wet localities of Ghana. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**. v. 16, n. 2, p. 125–138, 2019. DOI: 10.1007/s13196-019-00248-7.
- ANISH, M. C. et al. Effect of growth rate on wood quality of teak (*Tectona grandis* L. f.): a comparative study of teak grown under differing site quality conditions. **Journal of the Indian Academy of Wood Science**. v. 12, n. 1, p. 81–88, 2015. DOI: 10.1007/s13196-015-0147-1.
- ARAGÃO, L. E. O. C. et al. 21st Century drought-related fires counteract the decline of Amazon deforestation carbon emissions. **Nature Communications**. v. 9, n. 1, p. 1–12, 2018. DOI: 10.1038/s41467-017-02771-y.
- BALANZATEGUI, D. et al. Wood anatomy of douglas-fir in eastern Arizona and its relationship with pacific basin climate. **Frontiers in Plant Science**. v. 12, 2021. DOI: 10.3389/fpls.2021.702442.
- BARBOSA, M. L. F. et al. Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005 drought. **Environment, Development and Sustainability**. v. 21, n. 6, p. 2707–2720, 2019. DOI: 10.1007/s10668-018-0157-4.
- BRETFELD, M., EWERS, B. E., HALL, J. S. Plant water use responses along secondary forest succession during the 2015–2016 El Niño drought in Panama. **New Phytologist**. v. 219, n. 3, p. 885–899, 2018. DOI: 10.1111/nph.15071.
- BRITANNICA, T. Editors of Encyclopaedia. "Amazon Rainforest." Encyclopedia Britannica, December 30, 2019. <https://www.britannica.com/place/Amazon-Rainforest>.
- CARLQUIST, S., HOEKMAN, D. A. Ecological wood anatomy of the woody southern Californian flora. **IAWA Bulletin**. v. 6, n. 4, p. 319–347, 1985.
- CARLQUIST, S. **Comparative Wood Anatomy**. Berlin, Springer series in wood science, 1988. v. 1.
- CARMO, F. H. D. J. do. et al. Climate variations affect the growth period of young *Tectona grandis* Linn F. in the Amazon. **Acta Botanica Brasilica**. v. 36, p. 1–11, 2022. DOI: 10.1590/0102-33062020abb0525.
- CASTAGNERI, D. et al. Xylem anatomical traits reveal different strategies of two Mediterranean oaks to cope with drought and warming. **Environmental and Experimental Botany**. v. 133, p. 128–138, 2017. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2016.10.009.

DE MICCO, V. et al. From xylogenesis to tree rings: Wood traits to investigate tree response to environmental changes. **IAWA Journal**. v. 40, n. 2, p. 155–182, 2019. DOI: 10.1163/22941932-40190246.

EMBRAPA SOLOS. **Mapa de solos do Brasil**. 2020. GeoInfo. Disponível em: [http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil\\_solos\\_5m\\_20201104](http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Abrasil_solos_5m_20201104).

FAO. **Understanding the drought impact of El Niño on the global agricultural areas: An assessment using FAO's Agricultural Stress Index (ASI)**. 2014.

HONG, Y. et al. Tree ring anatomy indices of *Pinus tabuliformis* revealed the shifted dominant climate factor influencing potential hydraulic function in western Qinling Mountains. **Dendrochronologia**. v. 70, p. 125881, 2021. DOI: 10.1016/j.dendro.2021.125881.

ISLAM, M., RAHMAN, M., BRÄUNING, A. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. **Dendrochronologia**. v. 53, p. 63–72, 2019.

LOPES, M. N. G., DE SOUZA, E. B., FERREIRA, D. B. da S. Climatologia regional da precipitação no estado do Pará. **Revista Brasileira de Climatologia**. v. 12, p. 84–102, 2013.

MACEDO, R. L. G. et al. Fenologia e crescimento inicial de *Tectona grandis* L. F (teca) em lavras minas gerais. **Cerne**. v. 13, p. 81–90, 2007.

MATISONS, R. et al. Plasticity and climatic sensitivity of wood anatomy contribute to performance of eastern Baltic provenances of Scots pine. **Forest Ecology and Management**. v. 452, n. August, 2019. DOI: 10.1016/j.foreco.2019.117568.

MEINZER, F. C. et al. Coordination of leaf and stem water transport properties in tropical forest trees. **Oecologia**. v. 156, n. 1, p. 31–41, 2008. DOI: 10.1007/s00442-008-0974-5.

MENEZES, I. R. N. et al. Teleconnections and edaphoclimatic effects on tree growth of *Cedrela odorata* L. in a seasonally dry tropical forest in Brazil. **Dendrochronologia**. v. 72, 2022. DOI: 10.1016/j.dendro.2022.125923.

OLANO, J. M. et al. New star on the stage: Amount of ray parenchyma in tree rings shows a link to climate. **New Phytologist**. v. 198, n. 2, p. 486–495, 2013. DOI: 10.1111/nph.12113.

OLSON, M. et al. Xylem vessel-diameter–shoot-length scaling: ecological significance of porosity types and other traits. **Ecological Monographs**. v. 90, n. 3, 2020. DOI: 10.1002/ecm.1410.

PALOMO-KUMUL, J. et al. El Niño-Southern Oscillation affects the water relations of tree species in the Yucatan Peninsula, Mexico. **Scientific Reports**. v. 11, n. 1, p. 1–15, 2021. DOI: 10.1038/s41598-021-89835-8.

RODRÍGUEZ-RAMÍREZ, E. C. et al. Plastic responses of *Magnolia schiedeana* Schldl., a relict-endangered mexican cloud forest tree, to climatic events: Evidences from leaf venation and wood vessel anatomy. **Forests**. v. 11, n. 11, p. 1–18, 2020. DOI: 10.3390/F11070737.

SAIMA, S. et al. Changes in anatomical features along the altitudinal and rainfall gradients in Pakistan. **Journal of Animal and Plant Sciences**. v. 31, n. 4, p. 1107–1115, 2021. DOI: 10.36899/JAPS.2021.4.0308.

SOUZA, R. S. et al. Anatomical characteristics of *Tectona grandis* L.f. from different sites in Mato Grosso state. **Ciencia Florestal**. v. 29, n. 4, p. 1528–1537, 2019. DOI: 10.5902/1980509834563.

TAIZ, L., ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. 6th. ed. Porto Alegre, Artmed, 2017.

UPADHYAY, K. K. et al. Dendroclimatology of teak indicates prevailing climatic conditions of tropical moist forests in India. **Ecological Indicators**. v. 129, p. 107888, 2021. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.107888.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A. et al. Plasticity in xylem anatomical traits of two tropical species in response to intra-seasonal climate variability. **Trees - Structure and Function**. v. 29, n. 2, p. 423–435, 2015. DOI: 10.1007/s00468-014-1121-z.

ZAW, Z. et al. Drought Reconstruction Over the Past Two Centuries in Southern Myanmar Using Teak Tree-Rings: Linkages to the Pacific and Indian Oceans. **Geophysical Research Letters**. v. 47, n. 10, p. 0–3, 2020. DOI: 10.1029/2020GL087627.

## **CAPÍTULO III**

### **ACÚMULO DE BIOMASSA NO FUSTE DE *Tectona grandis* Linn F. DURANTE A SECA DO EVENTO DE EL NIÑO 2015/2016 NA AMAZÔNIA**



## RESUMO

O crescimento das plantas é influenciado pelas condições do meio onde ela se desenvolve. Flutuações do clima, como precipitação e temperatura, têm influência direta na planta, que, de forma estratégica, adapta-se para garantir seu crescimento e reprodução no período no qual o ambiente está passando por modificações e também no próximo, realizando alocação de biomassa conforme necessário. Assim, o objetivo deste estudo foi de avaliar como ocorreu a alocação de biomassa no fuste de *Tectona grandis* Linn f., diante a ocorrência de evento de El Niño na Amazônia. Para isso, foram amostradas árvores da espécie com 12 anos de idade, obtendo-se os incrementos corrente anual em volume ( $m^3$ ) e biomassa aparente (kg). Além disso, utilizou-se de dados de satélite para obtenção da estimativa do fluxo de  $CO_2$  ( $fCO_{2est}$ ), Produtividade Primária Bruta (GPP) e Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) para ajudar na compreensão dessas respostas e demonstrar a aplicabilidade dessas ferramentas para este tipo de estudo na região. Os resultados demonstraram a influência do evento na alocação de biomassa no fuste da espécie. A partir do período do evento de El Niño houve uma tendência de redução nos incrementos em volume e biomassa, também observada nos índices derivados das imagens de satélite, de modo que o  $fCO_{2est}$  se correlacionou de forma significativa negativa com o incremento em volume. Além disso, foi demonstrado a recuperação do crescimento da espécie pós-evento de El Niño. Porém, para o período 2017 esse crescimento não refletiu em crescimento do fuste, ocorrendo uma diminuição do ICAv em relação ao período 2016 e do  $fCO_{2est}$ , podendo indicar uma estratégia da espécie para manter seu desenvolvimento nos próximos períodos. Assim, observou-se que a ocorrência de El Niño pode influenciar negativamente os incrementos em volume e biomassa da espécie na Amazônia, e que as ferramentas de sensoriamento remoto são úteis e podem ajudar a compreensão dessas respostas.

**Palavras-chave:** Fluxo de  $CO_2$ , GPP, ENSO, teca, incremento

## ABSTRACT

Plant growth is influenced by the conditions of the environment where it develops. Climate fluctuations, such as precipitation and temperature, have a direct influence on the plant, which, strategically, adapts to ensure its growth and reproduction in the current period in which the environment is undergoing modifications and in the next period, performing biomass allocation as needed. Thus, the aim of this study was to evaluate how biomass was allocated in the *Tectona grandis* Linn f. stem, during the occurrence of an El Niño event in the Amazon. The trees were sampled at 12 years old, obtaining current annual increments in volume (m<sup>3</sup>) and apparent biomass (kg). In addition, satellite images were used to obtain the estimate of CO<sub>2</sub> flux (fCO<sub>2est.</sub>), Gross Primary Productivity (GPP) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to help understand these responses and demonstrate the applicability of these tools for this type of study in the region. The results demonstrated the influence of the event on the allocation of biomass in the stem of the species. From the El Niño event period there was a reduction trend in volume and biomass increments, also observed in the indices derived from satellite images, with the fCO<sub>2est.</sub> significantly negatively correlated with the increment in volume. In addition, it was demonstrated the recovery of the species growth on the post-El Niño event. However, for the period 2017 this growth did not reflect in the growth of the stem, with a decrease in the ICA<sub>v</sub> and fCO<sub>2est.</sub> in relation to the period 2016, which may indicate a strategy of the species to maintain its development in the post periods. Thus, it was observed that the occurrence of El Niño can negatively influence the increment in volume and biomass of the species in the Amazon, and that remote sensing tools are useful and can help the understanding of these responses.

**Keywords:** CO<sub>2flux</sub>, GPP, ENSO, Teak, Increment

## 1 INTRODUÇÃO

Fatores abióticos como a intensidade de luz, temperatura, disponibilidades de nutrientes, água e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) são alguns dos fatores que afetam o desenvolvimento das plantas (TAIZ et al., 2017). Quando ocorrem flutuações na disponibilidade de um ou mais desses fatores, as plantas buscam compensar essas condições estressantes alterando seus processos fisiológicos e de desenvolvimento para manter o crescimento e reprodução (TAIZ et al., 2017). Assim, a compreensão desses processos é de fundamental importância para estudos sobre ecologia, evolução e para entendimento das formas de alocação da biomassa em função das variáveis do clima (ZHANG et al., 2015).

Com as mudanças climáticas, duas situações, que afetam diretamente as plantas, ocorrem. Primeiramente, há o efeito do aumento do CO<sub>2</sub> na atmosfera que pode trazer um efeito positivo na produtividade, pois esse é utilizado no processo de fotossíntese (HUANG et al., 2007). No entanto, o segundo efeito diz respeito à ocorrência de eventos climáticos extremos, que são responsáveis, por exemplo, pela redução da precipitação e aumento da temperatura, afetando negativamente a produtividade (RAHMAN et al., 2019). Plantas perenes como a *Tectona grandis* já demonstraram serem sensíveis à essas mudanças, pois a maior disponibilidade de água favorece positivamente o crescimento radial da espécie (ISLAM et al., 2019; VENEGAS-GONZÁLEZ et al., 2018).

Dentre as formas de se avaliar os efeitos das mudanças do clima na produtividade florestal está o estudo sobre o acúmulo de biomassa pelas plantas. Com o avanço das ferramentas de sensoriamento remoto, tornou-se possível obter estimativas, próximas às obtidas por medições em campo, de forma mais rápida, menos onerosa e com maior escala de amostragem (PALMER, 2018). A Produtividade Primária Bruta (GPP), que representa uma medida da absorção de carbono pelas plantas através da fotossíntese (BETTS et al., 2020), pode ser utilizada para este tipo de avaliação, podendo ser obtida a partir do sensor MODIS, que fornece informações a cada 8 dias (TURNER et al., 2006). Outra estimativa utilizada para estudo da produtividade é o fluxo de CO<sub>2</sub>, relacionado aos processos de fotossíntese e respiração, que pode ser obtido a partir do sensor Landsat-8, que apresenta resolução temporal de 16 dias.

Aliada à essas técnicas, as mensurações diretas da biomassa das plantas podem ser utilizadas para aumentar a precisão das medidas por imagem. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi de avaliar o incremento de biomassa no fuste de árvores de *Tectona grandis*, localizadas na Amazônia, diante da ocorrência de um evento de El Niño nos anos de 2015/2016, utilizando-se de dados de satélite e mensuração diretas do fuste.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo e amostragem do material

O material utilizado nesse estudo foi proveniente de plantios comerciais de *Tectona grandis* Linn F., localizados no município de Santa Maria das Barreiras, região sudeste do estado do Pará. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é o Tropical Aw, com temperaturas médias de 18 e 22°C nos meses mais frio e quente do ano, respectivamente e precipitação total anual entre 1900 e 2200 mm (ALVARES et al., 2013), sendo os meses entre junho e agosto os mais secos do ano.

Coletou-se, de forma destrutiva, 24 árvores, com 12 anos de idade. De seis árvores retirou-se discos em diferentes alturas (0,3; 1,0; 4,1; 7,2 e 10,3 metros) destinados aos ensaios de densitometria de raios-X, ajuste do modelo de afilamento (a partir da largura dos anéis de crescimento) e análise de tronco. Das demais árvores retirou-se discos das alturas de 0,3 e 1,0 m, também utilizados para os ensaios de densitometria de raios-X.

Para todas as análises, fez-se a avaliação por anel de crescimento, que normalmente representa o crescimento de um ano e que para a teca inicia com as primeiras chuvas após o período de seca. Assim, para este estudo, o anel de crescimento ou o período de 2014, por exemplo, foi considerado como tendo início em setembro de 2014 (início do período chuvoso) e término em agosto de 2015 (final do período seco).

Ao longo dos últimos anos antes da coleta em campo, ocorreu um evento de El Niño classificado como forte (L'HEUREUX et al., 2017), que foi responsável por uma redução na precipitação e pequeno aumento da temperatura na Amazônia. Assim, para esse estudo, considerou-se os períodos pré-El Niño (2013), El Niño (2014/2015) e pós-El Niño (2016/2017) para avaliação.

### 2.2 Densitometria de raios-X

Retirou-se uma seção diametral de aproximadamente 2 x 2 cm (espessura e largura), de cada disco ao longo das diferentes alturas. Posteriormente, utilizando uma serra circular dupla, cortou-se as amostras no sentido transversal para que tivessem espessura aproximada de 2 mm. Posteriormente, levou-se as amostras para sala climatizada até atingirem a umidade de equilíbrio (aproximadamente 12%). Em seguida, obteve-se o perfil de densidade de cada amostra, por meio do equipamento QTRS-01X (Quintek Measurement Systems, EUA), com as leituras feitas a cada 40 µm. Após, gerou-se um arquivo com os valores de densidade de cada ponto de leitura. A partir dessa variação (densidade e distância) foi possível definir o limite de cada anel de crescimento, obtendo-se, assim, as larguras dos anéis de crescimento da base e em diferentes alturas (para as seis árvores). Também, foi realizada uma inspeção visual para ajudar na delimitação do anel de crescimento e confirmar a largura encontrada pela técnica de densitometria. Esses dados foram posteriormente utilizados para a análise do tronco.

### 2.3 Funções de afilamento

A partir dos dados dos diâmetros ( $d_i$ ), obtidos em diferentes alturas ( $h_i$ ), do diâmetro à 1,0 m do solo ( $D_i$ ) e da altura comercial ( $H_i$ ) para cada período, nas seis árvores, foram avaliadas as funções de afilamento “Polinômio de Quinto Grau” e “Modelo de Kozak” (Tabela 4). Estas funções foram utilizadas com a finalidade de estimar  $d_i$  e  $h_i$  em qualquer posição do tronco, para as 18 árvores que não foram amostradas de forma completa. Os ajustes foram realizados em cada conjunto de dados no período de 2012 a 2017.

**Tabela 4.** Funções de afilamento testadas.

Modelo	Referência
$\frac{d_i}{D_j} = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 T_i^2 + \beta_3 T_i^3 + \beta_4 T_i^4 + \beta_5 T_i^5 + \varepsilon_i$	Polinômio do 5º Grau (SCHÖEPFER, 1966)
$\frac{d_i^2}{D_j^2} = \beta_0 + \beta_1 T_i + \beta_2 T_i^2 + \varepsilon_i$	Modelo de Kozak (KOZAK et al., 1969)

$d_i$  – diâmetro sem casca (cm) na altura  $h_i$ ;  $D_j$  – diâmetro sem casca (cm) medido à 1,0m de altura;  $h_i$  – distância do solo até o ponto em que  $d_i$  é mensurado;  $H_i$  – altura comercial (m);  $\beta_i$  – coeficientes do modelo;  $T = h_i/H_i$ ; e  $\varepsilon_i$  – erro aleatório.

A seleção do modelo mais adequado para estimar o afilamento das árvores foi realizada com base na Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), Erro Médio Absoluto (EMA), e Coeficiente de Determinação Ajustado ( $R^2_{aj}$ ). A RQEM avalia a diferença média entre as estimativas do modelo ajustado e as observações nas árvores amostras, o EMA indica o nível de viés associado ao modelo, enquanto o  $R^2_{aj}$  representa a precisão das estimativas obtidas pelo modelo (SILVEIRA et al., 2019).

#### 2.4 Análise de tronco

A partir das larguras dos anéis de crescimento nas diferentes alturas e idades, utilizando-se a técnica de ANATRO (análise de tronco), conforme descrito por Campos & Leite (2013), obteve-se o Incremento Corrente Anual em volume ( $m^3$ ) - ICAv. Para isso, calculou-se a área transversal ( $m^2$ ) para cada altura do fuste e posteriormente, utilizando-se a fórmula de Smalian, obteve-se o volume de madeira para cada seção, sendo o volume total obtido a partir da soma das seções, para cada período de crescimento.

Adicionalmente, para as seis árvores amostradas de forma completa, utilizou-se os dados de densidade aparente, por anel de crescimento, para obtenção da Biomassa aparente (kg). Para isso, considerou-se a média de densidade aparente dos dois discos da seção, por anel de crescimento, multiplicando-a pelo volume de madeira da seção correspondente. A biomassa aparente, por período de crescimento, foi obtida a partir da soma das seções, sendo possível assim, obter o Incremento Corrente Anual em biomassa aparente (kg) – ICAb.

#### 2.5 Produtos do sensoriamento remoto

Visando parametrizar o fluxo fotossintético, utilizou-se o modelo de  $CO_{2flux}$  (fluxo de  $CO_2$ ), que foi desenvolvido originalmente para florestas boreais (RAHMAN et al., 2001) e posteriormente adaptado e utilizado para região amazônica (DOS SANTOS, 2017; DELLA-SILVA et al., 2022). O modelo é baseado em dois índices, Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (ROUSE et al., 1974) e Índice de Refletância Fotoquímica escalonado (sPRI) (RAHMAN et al., 2001). O NDVI é relacionado à fração de radiação fotossintética absorvida pela vegetação verde, sendo sensível à quantidade de área foliar do dossel (RAHMAN et al., 2001). Já o Índice de Refletância Fotoquímica trata-se de uma medida da eficiência do uso da luz da vegetação fotossinteticamente ativa e detecta a resposta dos pigmentos xantofílicos às mudanças das condições de luz (GAMON et al., 1990; GAMON et al., 1992).

Nesta pesquisa, para estimativa do fluxo de  $CO_2$ , utilizou-se os dados orbitais do satélite Landsat-8 (30 m de resolução), conforme Della-Silva et al. (2022), que demonstraram que esse modelo pode ser baseado em imagens multiespectrais de acesso livre, como as obtidas pelo satélite Landsat-8. O critério para a seleção das imagens Landsat-8 foi a cobertura de nuvens menor que 20%.

Assim, o fluxo de  $CO_2$  estimado ( $fCO_{2est}$ ) ( $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ ) foi calculado conforme a equação (DOS SANTOS, 2017; DELLA-SILVA et al., 2022):

$$fCO_{2est} = 13,63 - 66,207 * (sPRI * NDVI)$$

Sendo, sPRI calculado por:

$$sPRI = \frac{(\rho_{Azul} - \rho_{Verde}) + 1}{2}$$

E NDVI calculado por:

$$NDVI = \frac{\rho_{Infravermelho\ próximo} - \rho_{Vermelho}}{\rho_{Infravermelho\ próximo} + \rho_{Vermelho}}$$

Como uma medida do uso eficiente da radiação solar pela vegetação, utilizou-se a Produtividade Primária Bruta (GPP) obtida pelo produto MOD17A2H, versão 006, com 500 metros de resolução (HEINSCH et al., 2003). Produtividade Primária Bruta é uma taxa relacionada à transformação da energia solar em energia química, na forma de biomassa, através da fotossíntese (ZHANG et al., 2016). Também se utilizou os dados do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) do produto MOD13Q1 V006, com resolução temporal de 16 dias e resolução espacial de 250m.

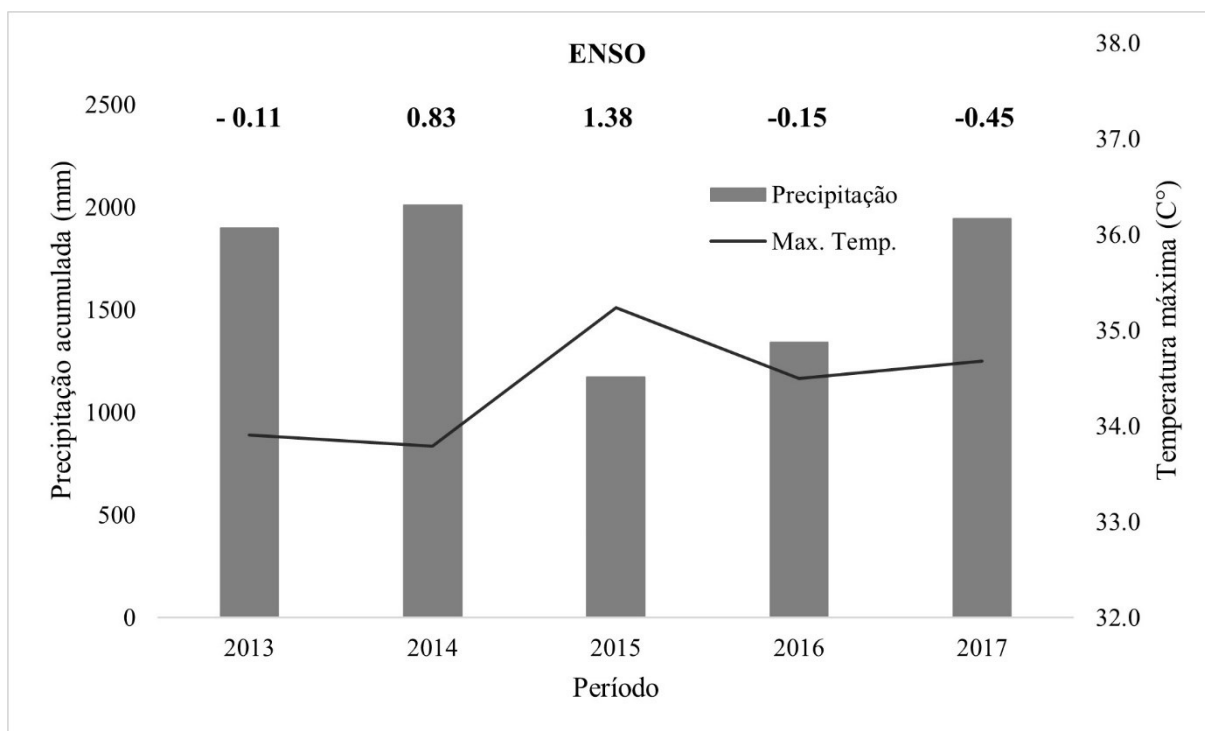
Todos os dados (GPP, NDVI e imagens Landsat-8) foram adquiridos para o período de 04-09-2013 a 17-08-2018 e a composição foi realizada na plataforma *Google Earth Engine*. Ao todo foram adquiridas 58 imagens Landsat-8, sendo o horário de passagem do satélite para aquisição das imagens compreendido entre 13:30 e 13:33h.

Para cada talhão de plantio foi utilizado o valor mediano dessas variáveis ( $fCO_{2est.}$ , NDVI e GPP). Como o  $fCO_{2est.}$  e o NDVI possuem resolução temporal de 16 dias, foi realizada uma média das duas medidas mensais. Já para o GPP, com resolução temporal de 8 dias, foi realizada uma média das quatro medidas mensais, dividiu-se o valor por 8 e multiplicou por 30, para obtenção da Produtividade Primária Bruta por mês ( $kg\ C\ m^{-2}\ mês^{-1}$ ), conforme Heinsch et al. (2003).

## 2.6 Dados climáticos

Adquiriu-se os dados climáticos de precipitação total (mm) e temperaturas máxima ( $^{\circ}C$ ), referentes aos anos 2012 a 2018, do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da estação convencional de Conceição do Araguaia – PA (Figura 13).

Da plataforma National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) adquiriu-se os dados de variação da temperatura da superfície do Oceano Pacífico (El Niño). Essa variação da temperatura das águas provoca uma reorganização da circulação atmosférica, ocasionando eventos climáticos extremos ao redor do globo. Quando o índice é maior ou igual a  $+5^{\circ}C$  ocorre o fenômeno El Niño e quando o índice é menor ou igual a  $-5^{\circ}C$  ocorre o fenômeno de La Niña (FAO, 2014) (Figura 13).



**Figura 13.** Dados climáticos de Precipitação (mm), Temperatura máxima (°C) e ENSO, durante os períodos de 2013 a 2017, para a área de estudo.

## 2.7 Análise de dados

A variação da densidade aparente entre as diferentes alturas, para cada período, e entre os períodos para cada altura foi testada usando análise de variância e teste de Scott-Knott ( $\alpha = 0,05$ ). Para avaliar o efeito dos períodos nas variáveis relacionadas à biomassa, foi utilizada uma análise de variância multivariada (MANOVA), sendo considerado o ICA<sub>v</sub>, fCO<sub>2est.</sub>, GPP e NDVI como variáveis resposta, com a significância testada por Wilk's Lambda. Posteriormente foi analisada a variação em cada variável resposta separadamente usando a análise de variância univariada e teste de Scott-Knott ( $\alpha = 0,05$ ). A variação do ICA<sub>b</sub> entre os períodos, foi testada usando a análise de variância e teste de Scott-Knott ( $\alpha = 0,05$ ). A matriz de correlação entre as variáveis ICA<sub>v</sub>, fCO<sub>2est.</sub>, GPP e NDVI foi gerada pela análise de Pearson ( $\alpha = 0,05$ ). Foi utilizado o teste de Shapiro-Wilk ( $\alpha = 0,05$ ) para testar a normalidade dos dados.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Funções de afilamento

Através de todas as estatísticas de ajuste avaliadas, o Polinômio do 5º Grau foi mais eficiente que o modelo de Kozak na modelagem do afilamento da teca (Tabela 5). Em média, os erros obtidos pelo Polinômio do 5º Grau foram cerca de 2 vezes menores em relação ao de Kozak (RQEM = 2,12), apresentando a maior precisão ( $R^2_{aj.} = 0,84$ ) associada ao menor nível de tendência das estimativas (EMA = -0,07).

**Tabela 5.** Medidas de precisão dos modelos ajustados.

Período	Polinômio de 5º Grau			Kozak		
	RQEM	EMA	$R^2_{aj.}$	RQEM	EMA	$R^2_{aj.}$
2017	2,169	-0,101	0,853	5,375	0,437	0,683
2016	2,156	-0,080	0,844	5,173	0,429	0,670
2015	2,123	-0,076	0,840	4,925	0,471	0,668
2014	2,167	-0,061	0,831	4,759	0,419	0,651
2013	2,193	-0,079	0,828	4,477	0,292	0,641
2012	2,070	-0,052	0,841	3,966	0,225	0,660

\*RMSE: Raiz Quadrada do Erro Médio; RMA: Erro Médio Absoluto;  $R^2_{aj.}$ : Coeficiente de Determinação ajustado.

Na tabela 6 são apresentados os coeficientes ajustados para a equação do Polinômio de 5º grau, que foi selecionada para a aplicação do modelo na estimativa dos diâmetros em diferentes alturas.

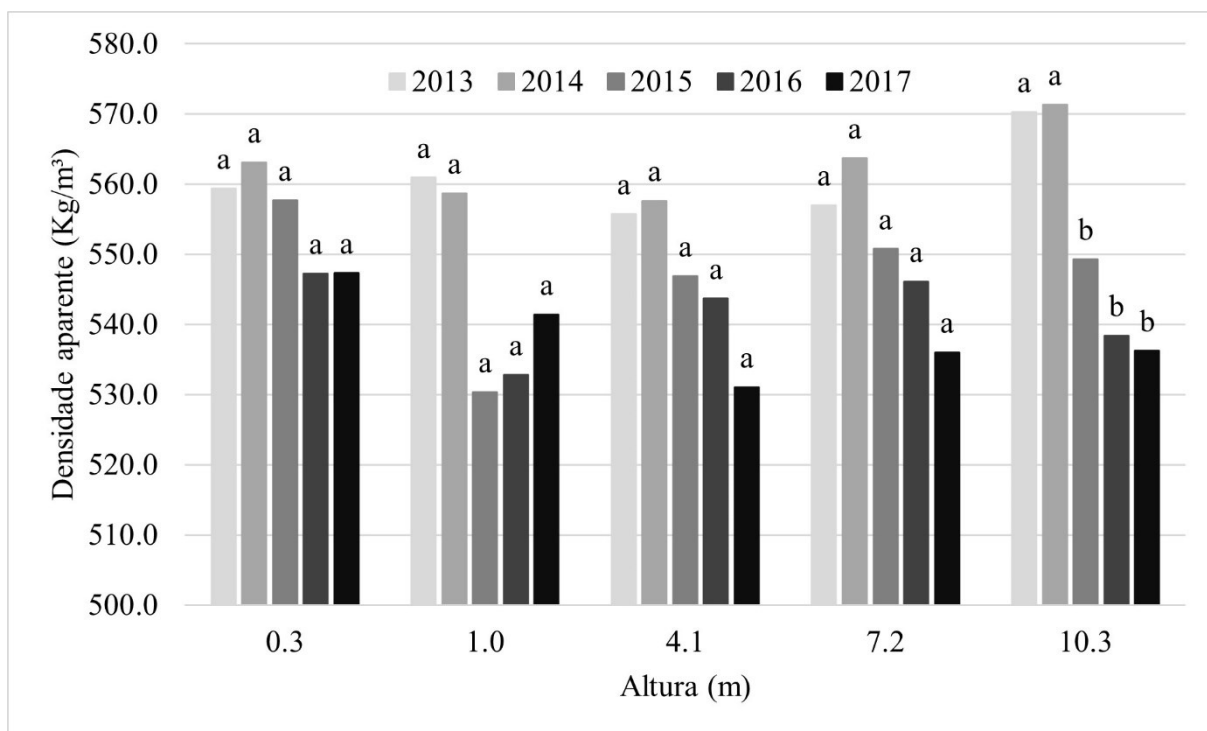
**Tabela 6.** Coeficientes estimados para o modelo de Polinômio de 5º Grau.

Período	Coeficientes					
	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\beta_4$	$\beta_5$
2017	1,671	-12,037	68,065	-176,009	200,904	-81,978
2016	1,680	-12,207	69,150	-179,264	204,962	-83,734
2015	1,669	-11,404	59,063	-143,472	156,795	-62,104
2014	1,674	-10,925	51,036	-113,277	115,330	-43,343
2013	1,714	-11,832	58,006	-135,286	143,211	-55,381
2012	1,742	-13,134	73,177	-191,273	220,014	-90,195

#### 3.2 Densitometria de raios-X

Na Figura 14 são apresentados os valores médios de densidade aparente para as diferentes alturas e período de crescimento. A comparação entre as diferentes alturas, dentro de cada período de crescimento, não indicou diferença significativa. Na comparação entre os períodos de crescimento, para cada altura, houve diferença somente para a altura de 10,3 m, com os períodos iniciais (2013 e 2014) apresentando as maiores densidades aparentes.





**Figura 14.** Densidade aparente média por período de crescimento e em diferentes alturas. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, para cada altura, pelo teste de Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ).

### 3.3 Efeito do El Niño na madeira e produtos do sensoriamento remoto

A partir da análise multivariada da variância (MANOVA), demonstrou-se que existe diferença estatística entre os períodos, para todas as variáveis independentes (ICAv ( $m^3$ ),  $fCO_{2est}$  ( $\mu mol m^{-2} s^{-1}$ ), GPP ( $Kg C m^{-2} mês^{-1}$ ) e NDVI), quando analisadas em conjunto ( $p=0,003$ ). A partir desse resultado, por meio da análise de variância univariada (ANOVA), observou-se diferença significativa entre os períodos para o ICAv e  $fCO_{2est}$ . (Tabela 7).

**Tabela 7.** Resumo da análise de variância univariada para ICAv,  $fCO_{2est}$ , GPP e NDVI nos períodos de 2013 a 2017.

	Variável dependente	Soma de quadrados	gl	Quadrado médio	F	p-valor
<b>Tratamento</b>	ICAv	0,00145	4	0,00036	5,735	<b>0,001*</b>
	$fCO_{2est}$	22,43740	4	5,61000	4,230	<b>0,007*</b>
	GPP	0,00229	4	0,00057	1,193	0,331
	NDVI	0,00369	4	0,00092	0,995	0,423
<b>Resíduos</b>	ICAv	0,00222	35	0,00006		
	$fCO_{2est}$	46,40890	35	1,33000		
	GPP	0,01676	35	0,00048		
	NDVI	0,03245	35	0,000927		

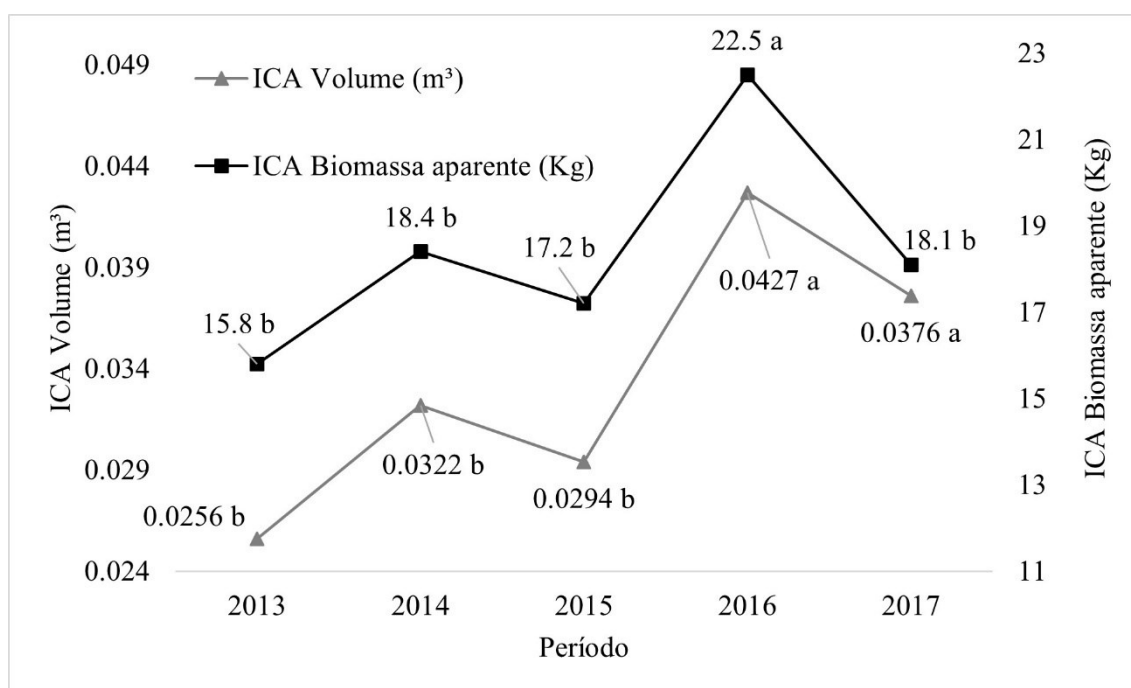
Na Tabela 8, são apresentadas as médias das variáveis ICAv,  $fCO_{2est}$ , GPP e NDVI segundo teste de Scott-Knott. Observou-se que o ICAv aumentou com a idade do material, com os períodos de 2016 e 2017 apresentando os maiores incrementos. Destaca-se aqui as reduções do ICAv, embora não significativa, entre os períodos de 2014 e 2015 e entre 2016 e 2017. Para o  $fCO_{2est}$ , observou-se os menores valores para os períodos 2013 e 2017, que diferiram estatisticamente dos demais. As variáveis GPP e NDVI não diferiram significativamente entre os períodos.

**Tabela 8.** Médias das variáveis ICAv, fCO<sub>2est.</sub>, GPP e NDVI entre os períodos de 2013 e 2017 segundo teste de Scott-Knott.

Variável	2013	2014	2015	2016	2017
ICA <sub>v</sub> (m <sup>3</sup> )	0,0256 b	0,0322 b	0,0294 b	0,0427 a	0,0376 a
fCO <sub>2est.</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	-4,8852 a	-3,7184 b	-3,8118 b	-4,3684 b	-5,7468 a
GPP (Kg C m <sup>-2</sup> mês <sup>-1</sup> )	0,1606 a	0,1600 a	0,1524 a	0,1604 a	0,1744 a
NDVI	0,7013 a	0,7182 a	0,6992 a	0,7140 a	0,7240 a

Médias seguidas pela mesma letra, na linha, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ).

Na Figura 15 são apresentados os valores médios de ICAv (das 24 árvores) e ICAb (das seis árvores amostradas de forma completa), durante o período de estudo. Ao longo dos períodos, ambos apresentaram o mesmo comportamento e pela análise de variância, diferiram somente no período 2017. Para o volume, os períodos 2016 e 2017 apresentaram os maiores resultados, diferindo dos demais. Já para a biomassa, o período 2016 apresentou o maior resultado. Destaca-se também o período 2015, que teve uma redução, embora não significativa, tanto para a biomassa quanto para o volume, em relação a 2014, indicando possível efeito do El Niño nos incrementos.



**Figura 15.** Incrementos Corrente Anual em volume (ICA<sub>v</sub>) e Biomassa aparente (ICA<sub>b</sub>) entre os períodos de 2013 e 2017. Médias seguidas pela mesma letra, para cada variável, não diferem entre si, pelo teste de Scott-Knott ( $\alpha=0,05$ ).

### 3.4 Relações entre o incremento e informações de sensoriamento remoto

A partir da matriz de correlação entre o ICA<sub>v</sub> e dados de sensoriamento remoto (Tabela 9), observou-se algumas correlações significativas. O ICA<sub>v</sub> se correlacionou negativamente com o fCO<sub>2est.</sub>, ou seja, quanto maior o ICA<sub>v</sub>, menor o fCO<sub>2est.</sub>. Já o fCO<sub>2est.</sub> e o GPP, conforme esperado, se correlacionaram negativamente, ou seja, quanto maior o fCO<sub>2est.</sub>, menor o GPP. Também, o GPP se correlacionou de forma positiva com o NDVI.

**Tabela 9.** Matriz de correlação entre o ICAv, fCO<sub>2est</sub>, GPP e NDVI.

	<b>ICA<sub>v</sub></b>	<b>fCO<sub>2est</sub></b>	<b>GPP</b>	<b>NDVI</b>
<b>ICA<sub>v</sub></b>	-			
<b>fCO<sub>2est</sub></b>	<b>-0,332</b> (0,036)	-		
<b>GPP</b>	0,294 (0,115)	<b>-0,49</b> (<0,01)	-	
<b>NDVI</b>	0,264 (0,1)	-0,268 (0,095)	<b>0,737</b> (<0,001)	-

Valores entre parênteses indicam o valor-p.

## 4 DISCUSSÕES

Neste estudo, utilizou-se o perfil de densidade da madeira, a partir da análise de densitometria de raios-x, para identificação da largura dos anéis de crescimento. A *Tectona grandis* é uma espécie que, de maneira geral, possui os anéis de crescimento bem delimitados, apresentando parênquima marginal em faixas e variação na largura dos elementos de vasos (DIÉ et al., 2015). Tais características fazem com que seja possível a identificação dos anéis a partir da análise de densitometria de raios-x, sendo observado um aumento da densidade do lenho inicial para o lenho tardio, com uma queda brusca nos valores no início da formação do anel do próximo período. No entanto, principalmente nos primeiros anos de desenvolvimento da espécie, essa identificação pode não ser tão clara, sendo interessante realizar, juntamente com a análise de raios-X, uma inspeção visual, como a realizada neste estudo, para prevenir erros de mensuração (GAITAN-ALVAREZ et al., 2019).

Com o avanço da idade da madeira houve uma redução significativa da densidade na altura de 10,3 m, mesmo comportamento observado para os discos das demais alturas, embora nesses não significativa. Variação essa já demonstrada ser pequena para madeira juvenil, no sentido medula-casca (BHAT et al., 2001). Tal resultado pode estar relacionado à largura do anel de crescimento, que foi maior para os dois primeiros períodos (2013 e 2014). De acordo com Kollmann (1968), embora existam resultados contraditórios entre a largura do anel de crescimento e a densidade da madeira, em madeiras com porosidade em anel, maiores larguras do anel de crescimento implicam em maiores densidades da madeira.

Ao longo dos períodos avaliados neste trabalho, observou-se uma tendência de aumento no Incremento Corrente Anual em volume (ICAv) com a idade do material, com exceção o período de 2015 (El Niño) e 2017. Essa tendência de aumento com a idade já foi demonstrada por Hao et al. (2022) que observaram o mesmo comportamento até os 12 anos de idade da espécie, localizada na China, sendo que após essa idade ocorreram reduções para alguns anos, com os maiores ICAv's alcançados aos 25 e 30 anos de idade. Da mesma forma Setiawan et al. (2019), comparando 5 modelos de produção da espécie, observaram a tendência de aumento do ICAv com a idade da espécie, até os 17-18 anos, aproximadamente, atingindo a produção ótima aos 25 anos. Já para plantios no Brasil, Maria et al. (2019) observaram, em indivíduos de teca com 53 meses de idade, a mesma tendência de aumento do ICAv, alcançando o maior incremento aos 53 meses.

A redução do ICAv está diretamente relacionada, também, com a quantidade de precipitação acumulada. No período de 2015, o evento de El Niño promoveu uma redução da precipitação, afetando o ICAv. Almeida et al. (2010), avaliando plantios comerciais de eucalipto, nos estados do Espírito Santo e Bahia, observaram que o evento de El Niño ocorrido no ano de 2003, que naquele ano promoveu uma redução de 58% da precipitação anual em relação à média de um período de 35 anos, provocou uma redução média de 38% do ICAv. Observaram também que no ano de 2004 houve uma recuperação do incremento. De acordo com os autores supracitados, essas respostas estão relacionadas à quantidade de água disponível para as plantas e destacam a importância de se considerar estudos sobre a profundidade e capacidade de carga de água do solo, bem como o desenvolvimento das raízes. Ainda, considerando o comportamento do ICAv e do ICAb para o período 2017, tais resultados, assim como a variação da densidade entre os anos, podem estar relacionados com a largura do anel de crescimento e da densidade (KOLLMANN, 1968).

A utilização de ferramentas do sensoriamento remoto para inferir sobre o fluxo de carbono na Amazônia é um primeiro passo para ajudar na compreensão dos impactos das mudanças climáticas na região (PALMER, 2018). O fluxo de CO<sub>2</sub> nas plantas está relacionado com a fotossíntese e com a respiração. Fluxos negativos indicam ganho de biomassa onde, neste caso, a planta age como um sumidouro de CO<sub>2</sub> (SILVA et al., 2017). Na Amazônia o fluxo de

CO<sub>2</sub> é altamente dependente da sazonalidade das chuvas, vez que a abertura estomática das plantas, responsável pela absorção de CO<sub>2</sub> para realização da fotossíntese, está sujeita a disponibilidade hídrica do solo. Assim, menores índices de precipitação, como exemplo nos anos de El Niño, conduzem à uma diminuição da absorção de CO<sub>2</sub> pelas plantas (SILVA et al., 2017), corroborando a tendência observada em nosso estudo. Assim, em anos de El Niño, de forma geral, ocorre uma menor absorção de CO<sub>2</sub>, e em anos de La Niña (maiores índices de precipitação na Amazônia, por exemplo), pode haver uma maior absorção de CO<sub>2</sub>. O evento de 2015/2016 promoveu uma mudança no fluxo de carbono terrestre devido, principalmente, aos processos fisiológicos das plantas (redução da produtividade e aumento da respiração) (BETTS et al., 2020).

Também, a produtividade primária bruta (GPP) é uma medida que pode ser obtida a partir de dados de satélite, através de uma variedade de métodos que levam em consideração a absorção de radiação solar pelas plantas (BETTS et al., 2020). Embora neste estudo não se tenha observado diferença do GPP ao longo dos períodos avaliados, no ano de 2015 observou-se aparente menor valor desta variável, indicando possível efeito do evento de El Niño na produtividade. O evento ocorrido em 2015 foi responsável por uma redução geral do GPP, especialmente nas regiões tropicais (LUO et al., 2018). Neste estudo, porém, deve-se considerar o efeito da mistura espectral para a variável GPP. A resolução de 500m do produto MOD17A2H, para alguns talhões, abrangeu regiões fora da área do plantio. No entanto, manteve-se os resultados de GPP devido às correlações que apresentou com os demais produtos, indicando que, embora a mistura espectral influencie nos valores obtidos, ainda capta a resposta geral do plantio.

Embora 2017 tenha sido um período com maior precipitação acumulada em relação a 2016, houve um recuo do crescimento do fuste em relação ao período anterior. Em 2016, o ICab e ICAv, embora este de forma não significativa, foram os mais altos, reduzindo em 2017. No entanto, os dados de sensoriamento remoto mostraram que as árvores tenderam a absorver mais CO<sub>2</sub> (diminuição do fCO<sub>2est.</sub>), aumentar o GPP (aumento da produtividade primária bruta) e aumentar o NDVI, podendo indicar que nesse período, as plantas investiram mais em crescimento de outras partes da planta e não no fuste. Uma explicação, seria a de que no período de 2017 a planta, em virtude da seca dos períodos anteriores, tenha alocado mais recursos no desenvolvimento radicular, pois em ambientes mais secos as plantas, no geral, apresentam raízes mais profundas (EZIZ et al., 2017). No entanto, essa ainda é uma relação complexa de se compreender (WARING & POWERS, 2017). Além disso, o alto NDVI (referente a copa) do período de 2017, é uma consequência da disponibilidade de água no ambiente e, não sendo este um fator limitante e não oferecendo riscos à segurança hidráulica da planta, faz com que ela invista em crescimento das folhas (copa) (QUAN et al., 2020), contribuindo assim com o maior GPP encontrado. Outro ponto que contribui para essa compreensão são as relações significativas entre a parte aérea e as raízes de teca, que apresenta padrões semelhantes de alocação de carbono entre esses compartimentos nas árvores (BEHLING et al., 2018). Portanto, em trabalhos futuros sobre o acúmulo de biomassa, utilizando-se ferramentas de sensoriamento remoto para ajudar na compreensão das respostas das plantas ao ambiente, é interessante que se considere a biomassa completa, não só do fuste, para que se tenha uma estimativa mais acurada da biomassa acumulada (KENZO et al., 2020). A partir desses dados, por exemplo, pode-se buscar o desenvolvimento de modelos para estimar o acúmulo de biomassa, nas diferentes partições da planta, a partir de dados de sensoriamento remoto.

## 5 CONCLUSÕES

O presente estudo demonstrou possível efeito do evento de El Niño na alocação de biomassa no fuste de *Tectona grandis*. No período de crescimento correspondente ao evento, observou-se uma tendência de redução do volume e no acúmulo de biomassa no fuste. Além disso, demonstrou-se que o  $fCO_{2est}$  pode ser uma alternativa para estimativa do acúmulo de biomassa no fuste. Ainda, pós-evento de El Niño, observou-se indícios que a espécie aumentou a alocação de biomassa em outras partes da planta e não só no fuste, podendo indicar uma estratégia da planta como medida de segurança para os próximos períodos de crescimento.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. C. et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on *Eucalyptus* plantation production with 3-PG, a process-based growth model. **Forest Ecology and Management**. v. 259, p. 1730-1740, 2010.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. v. 22, p. 711-728, 2013.
- BEHLING, M. et al. Relações entre parte aérea e raízes em povoamentos de teca. **Revista Ceres**. v. 65, n. 6, p. 463-473, 2018.
- BETTS, R. A. et al. ENSO and the carbon cycle. In: MCPHADEN, M. J.; SANTOSO, A.; CAI, W. **El Niño Southern Oscillation in a changing climate**. 1st ed. Washington, DC. 2020.
- BHAT, K. M.; PRIYA, P. B.; RUGMINI, P. Characterization of juvenile wood in teak. **Wood Science and Technology**. v. 34, p. 517-532, 2001.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4ed. Editora UFV, Viçosa, MG, 2013.
- DELLA-SILVA, J. L. et al. CO2Flux Model Assessment and Comparison between an Airborne Hyperspectral Sensor and Orbital Multispectral Imagery in Southern Amazonia. **Sustainability**. v. 14, n. 5458, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14095458>.
- DIÉ, A. et al. Tree rings show a different climatic response in a managed and non-managed plantation of teak (*Tectona grandis*) in West Africa. **IAWA Journal**. v. 36, p. 409-427, 2015.
- DOS SANTOS, C.V.B. Modelagem espectral para determinação de fluxo de CO<sub>2</sub> em áreas de caatinga preservada e em regeneração. 75p. **Dissertação** (Mestrado em Ciências Ambientais), Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, Brasil, 2017.
- EZIZ, A. et al. Drought effect on plant biomass allocation: A meta-analysis. **Ecology and Evolution**. v. 7, p. 11002-11010, 2017.
- FAO. **Understanding the drought impact of El Niño on the global agricultural areas: An assessment using FAO's Agricultural Stress Index (ASI)**. 2014.
- GAITAN-ALVAREZ, J.; MOYA, R.; BERROCAL, A. The use of X-ray densitometry to evaluate the wood profile of *Tectona grandis* trees growing in fast-growth plantations. **Dendrochronologia**. v. 55, p. 71-79, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.04.004>
- GAMON, J.A.; PEÑUELAS, J.; FIELD, C.B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing Environment**. v. 41, n. 1, p. 35-44, 1992. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90059-S](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90059-S)
- GAMON, J. A. et al. Remote sensing of the xanthophyll cycle and chlorophyll fluorescence in sunflower leaves and canopies. **Oecologia**. v. 85, p. 1-7, 1990.

- HAO, J. et al. Growth process and heartwood formation for planted teak (*Tectona grandis*) in South China. **Austrian Journal of Forest Science**. v. 2, p. 97-116, 2022.
- HEINSCH, F. A. et al. **User's Guide: GPP and NPP (MOD17A2/A3) products NASA MODIS land algorithm**. p. 1–57, 2003.
- HUANG, J. G. et al. Response of forest trees to increased atmospheric CO<sub>2</sub>. **Critical Reviews in Plant Sciences**. v. 26, n. 5-6, p. 265-283, 2007.
- ISLAM, M.; RAHMAN, M.; BRÄUNING, A. Impact of extreme drought on tree-ring width and vessel anatomical features of *Chukrasia tabularis*. **Dendrochronologia**. v. 53, p. 63-72, 2019.
- KENZO, T. et al. General estimation models for above- and below-ground biomass of teak (*Tectona grandis*) plantations in Thailand. **Forest Ecology and Management**. v. 457, 2020.
- KOLLMANN, F. F. P. Physics of wood. In: KOLLMANN, F.F. P.; CÔTÉ JR, W. A. **Principles of wood science and technology: I Solid wood**. Springer-Verlag, New York Inc. 1968. 592p.
- KOZAK, A.; MUNRO, D. D.; SMITH, J. G. H. Taper functions and their applications in forest inventory. **Forestry Chronicle**. v. 45, n. 4, p. 278-283, 1969.
- L'HEUREUX, M. L. et al. Observing and predicting the 2015/16 El Niño. **Bulletin of the American Meteorological Society**. v. 98, n. 7, p. 1363-1382, 2017.
- LUO, X. et al. The impact of the 201/2016 El Niño on global photosynthesis using satellite remote sensing. **Philosophical Transactions B**. v. 373, 2018.
- MARIA, L. S. et al. Dendrometric evaluation of a clonal population of *Tectona grandis* in forest-livestock system. **Ciência Rural**. v. 49, n. 9, 2019.
- PALMER, P. I. The role of satellite observations in understanding the impact of El Niño on the carbon cycle: current capabilities and future opportunities. **Philosophical Transactions B**. v. 373, 2018.
- QUAN, Q. et al. Shifting biomass allocation determines community water use efficiency under climate warming. **Environmental Research Letters**. v. 15, 2020.
- RAHMAN, A.F. et al. Modeling spatially distributed ecosystem flux of boreal forest using hyperspectral indices from AVIRIS imagery. **Journal of Geophysical Research**. v. 106, n. D24, p. 33579-33591, 2001. <https://doi.org/10.1029/2001jd900157>
- RAHMAN, M. et al. Trends in tree growth and intrinsic water-use efficiency in the tropics under elevated CO<sub>2</sub> and climate change. **Trees**. v. 33, p. 623-640, 2019.
- ROUSE, J.W. et al. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In **Proceedings of the ERTS-1 Symposium**. Washington, DC, USA, v. 351, p. 309-317, 1974.
- SCHÖEPFER, W. **Automatisierung des Massen, Sorten und Wertberechnung stenender Waldbestände**. Schriftenreihe Bad. Wurt-Forstl, 1966.



SETIAWAN, B. et al. Model of community forest land management production and financial simulation of super teal, Solomon teak and sungkai trees in Samboja Kutai Kartanegara East Kalimantan, Indonesia. **Energy and Environment Research**. v. 9, n. 2, 2019.

SILVA, P. V. C. et al. CO<sub>2</sub> na floresta nativa de Caxiuanã – Melgaço/PA. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**. v. 4, n. 9, 2017.

SILVEIRA, E. M. O. et al. Pre-stratified modelling plus residuals kriging reduces the uncertainty of aboveground biomass estimation and spatial distribution in heterogeneous savannas and forest environments. **Forest Ecology and Management**. v. 445, n. 1, p. 96–109, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.016>

TAIZ, L. et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6th ed. Porto Alegre, Artmed. 2017.

TURNER, D. P. et al. Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes. **Remote Sensing of Environment**. v. 102, p. 282-292, 2006.

VENEGAS-GONZÁLEZ, A. et al. Drought and climate change incidence on hotspot Cedrela forests from the Mata Atlântica biome in southeastern Brazil. **Global Ecology and Conservation**. v. 15, e00408, 2018. doi: 10.1016/j.gecco.2018.e00408

WARING, B. G.; POWERS, J. S. Overlooking what is underground: Root:shoot ratios and coarse root allometric equations for tropical forests. **Forest Ecology and Management**. v. 385, p. 10-15, 2017.

ZHANG, H. et al. Biogeographical patterns of biomass allocation in leaves, stems, and roots in China's forests. **Scientific Report**. v. 5, n. 15997, 2015.

ZHANG, Y. et al. Development of a coupled carbon and water model for estimating global gross primary productivity and evapotranspiration based on eddy flux and remote sensing data. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 223, p. 116-131, 2016.

## 2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente tese demonstrou que o clima além de afetar diretamente a produtividade da *Tectona grandis* Linn f., também pode afetar a duração do período de crescimento dela, sendo que a duração deste, no período corrente, pode afetar o crescimento radial das árvores no próximo período. Também foi demonstrado que o evento de El Niño (2015/2016) afetou o crescimento radial, as dimensões dos elementos de vaso e o acúmulo de biomassa no fuste da teca e que a utilização de ferramentas de sensoriamento remoto pode ajudar na compreensão da dinâmica das plantas frente às mudanças climáticas.