



KAICK COELHO DE SOUSA

**ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE CARBONO EM ANÉIS DE
CRESCIMENTO COMO PROXIES CLIMÁTICOS EM
FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA**

**LAVRAS-MG
2026**

KAICK COELHO DE SOUSA

**ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE CARBONO EM ANÉIS DE CRESCIMENTO COMO
PROXIES CLIMÁTICOS EM FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr.(a) Ana Carolina Maioli Campos Barbosa
Orientador(a)

LAVRAS-MG
2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Sousa, Kaick Coelho de.

Isótopos estáveis de carbono em anéis de crescimento como proxies climáticos em floresta tropical sazonalmente seca / Kaick Coelho de Sousa. - 2026.

33 p. : il.

Orientadora: Ana Carolina Maioli Campos Barbosa

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Isótopo de carbono. 2. Dendrocronologia tropical. 3. Anéis de crescimento. I. Barbosa, Ana Carolina Maioli Campos. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

KAICK COELHO DE SOUSA

**ISÓTOPOS ESTÁVEIS DE CARBONO EM ANÉIS DE CRESCIMENTO COMO
PROXIES CLIMÁTICOS EM FLORESTA TROPICAL SAZONALMENTE SECA**

**STABLE CARBON ISOTOPES IN GROWTH RINGS AS CLIMATIC PROXIES IN
SEASONALLY DRY TROPICAL FORESTS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Madeira, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 13 de fevereiro de 2026.

Dr.(a) Ana Carolina Maioli Campos Barbosa UFLA

Dr. Gabriel de Assis Pereira USP

Dr.(a) Maria Lucia Bianchi UFLA

Documento assinado digitalmente
 ANA CAROLINA MAIOLI CAMPOS BARBOSA
Data: 05/10/2026 16:10:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.(a) Ana Carolina Maioli Campos Barbosa
Orientador(a)

LAVRAS-MG
2026

Aos meus familiares, pelo amor e apoio, mesmo
nas diferenças e nos caminhos nem sempre
compreendidos.
E à persistência que guiou esta escolha pela
pesquisa, mantida firme mesmo diante das
dúvidas e incompreensões.

AGRADECIMENTOS

A Deus, princípio e sustento de todas as coisas, por iluminar meus caminhos, renovar minhas forças nos momentos de incerteza e fortalecer, diariamente, a fé que me manteve firme até aqui.

À Universidade Federal de Lavras, espaço que se tornou mais do que um lugar de formação, mas um verdadeiro território de transformação pessoal e intelectual. Aqui encontrei não apenas conhecimento, mas também desafios, amadurecimento e a oportunidade de construir uma trajetória pautada na ciência e no compromisso com a sociedade. Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da Madeira, pela excelência na formação, pelo rigor científico e pelo suporte essencial ao desenvolvimento desta pesquisa, permitindo que ideias se transformassem em construção concreta de conhecimento. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro, que viabilizou não apenas esta pesquisa, mas também a permanência e dedicação integral à vida acadêmica.

Aos meus familiares, por serem a base que me sustenta, mesmo quando os caminhos escolhidos não foram totalmente compreendidos. Ainda assim, nunca faltaram amor, presença e, à sua maneira, apoio - elementos que foram fundamentais para que eu pudesse seguir acreditando naquilo que escolhi construir.

À minha orientadora, pela confiança depositada, pela condução segura e pelos ensinamentos que ultrapassam o campo acadêmico, contribuindo de forma decisiva para minha formação como pesquisadora. Ao laboratório de dendrocronologia e aos colegas que dele fazem parte, pela convivência diária, pelas trocas sinceras e pelo aprendizado coletivo, que deram sentido e leveza à rotina científica.

Aos meus amigos, que transformaram essa caminhada em algo mais humano, mais leve e mais significativo. Em especial, à Andressa e Beatriz, por compartilharem comigo essa etapa em Lavras, dividindo não apenas espaços, mas experiências e sentimentos; à Thais, pela amizade constante, construída no tempo e fortalecida na presença; e à Juliana, Mariane e Jeymmy, por ocuparem um espaço tão marcante neste capítulo da minha vida.

Ao meu irmão, pelo carinho silencioso, pela admiração e pela presença que, mesmo quando discreta, sempre foi sentida e importante.

E, por fim e não menos importante, aos animais que caminharam comigo ao longo dessa trajetória, de forma muito especial, às minhas gatas Fátima e Olga, cujo amor simples, constante e verdadeiro foi refúgio, conforto e força nos momentos em que mais precisei. O amor destes é sem dúvida o mais verdadeiro.

*“Cada anel guarda um tempo
vivido, uma estação superada e
uma história ainda por
compreender.”*

RESUMO

A dendrocronologia isotópica, que liga o estudo dos anéis de crescimento à análise de isótopos estáveis, é uma ferramenta de potencial para reconstrução e correlação de condições ambientais e climáticas. Durante as estações do ano em que ocorrem períodos chuvosos e secos, os estômatos encontrados nas folhas das árvores regulam a troca gasosa, permitindo a entrada de dióxido de carbono (CO_2) necessário para a fotossíntese, processo que pode ser limitado em condições de seca devido ao fechamento parcial dos estômatos para evitar a perda excessiva de água. Durante este processo, a planta incorpora mais ^{13}C (pesado) em épocas de seca e mais ^{12}C em épocas chuvosas. Assim, os valores de δC na madeira refletem as condições ambientais e fisiológicas existentes no momento da formação dos anéis de crescimento. Para espécies arbóreas de regiões tropicais sazonais essa abordagem permite investigar respostas fisiológicas às variações hídricas e térmicas ao longo do tempo. Diante do cenário de mudanças climáticas, compreender como essas árvores respondem ao estresse hídrico é importante para a conservação e manejo desses ecossistemas. Dito isso este tem como objetivo desenvolver uma cronologia de delta C (δC) a partir de séries de anéis de crescimento anuais de *Cedrela fissilis* Vell., proveniente do Norte do estado de Minas Gerais, nas proximidades do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu, para investigar as relações entre as variações isotópicas e as variáveis climáticas, bem como as estratégias fisiológicas da espécie em um ambiente de Floresta Tropical Sazonalmente Seca. Foram extraídos α celulose de cada anel de crescimento de seis árvores já datadas, e posteriormente feita análise isotópica por espectrometria de massa com razão isotópica (IRMS) acoplado a um analisador elementar (EA-IRMS). Paralelamente, foram obtidos e compilados os dados climáticos históricos da região: precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de vapor de pressão. Os dados foram submetidos às análises de Correlação δC -Clima e Componentes Principais (PCA) para investigar padrões entre variáveis isotópicas, fisiológicas e climáticas. Como resultado, foi identificado um padrão intra-anual de ^{13}C , embora as séries individuais de $\Delta^{13}\text{C}$ apresentem baixo sincronismo em seus valores absolutos, observou-se uma elevada coerência interanual após a aplicação da primeira diferença, indicando respostas sincronizadas às variações ano a ano da precipitação, evidenciando que a disponibilidade hídrica atua como principal fator propulsor da composição isotópica do lenho. Os resultados indicam ainda que o carbono assimilado no ano anterior ao crescimento corrente, fortemente condicionado pelas chuvas, constitui a principal fonte para a formação do lenho.

Palavras-chave: Isótopo de carbono; Dendrocronologia tropical; Anéis de crescimento; Cedro.

ABSTRACT

Isotopic dendrochronology, which links the study of growth rings to the analysis of stable isotopes, is a tool with potential for reconstructing and correlating environmental and climatic conditions. During the seasons of the year in which rainy and dry periods occur, the stomata found in tree leaves regulate gas exchange, allowing the entry of carbon dioxide (CO₂) necessary for photosynthesis, a process that can be limited in dry conditions due to the partial closure of stomata to prevent excessive water loss. During this process, the plant incorporates more ¹³C (heavy) in dry periods and more ¹²C in rainy periods. Thus, the δ C values in wood reflect the environmental and physiological conditions existing at the time of growth ring formation. For tree species from seasonal tropical regions, this approach allows the investigation of physiological responses to hydrological and thermal variations over time. Given the scenario of climate change, understanding how these trees respond to water stress is important for the conservation and management of these ecosystems. Therefore, this study aims to develop a δ C (δ C) chronology from annual growth ring series of *Cedrela fissilis* Vell., from the northern region of Minas Gerais state, near the Cavernas do Peruáçu National Park, to investigate the relationships between isotopic variations and climatic variables, as well as the physiological strategies of the species in a seasonally dry tropical forest environment. α -cellulose was extracted from each growth ring of six previously dated trees, and subsequently isotopic analysis was performed using isotope ratio mass spectrometry (IRMS) coupled to an elemental analyzer (EA-IRMS). In parallel, historical climatic data from the region were obtained and compiled: precipitation, air temperature, Palmer drought index, and vapor pressure deficit. The data were subjected to δ C-Climate Correlation and Principal Component Analysis (PCA) to investigate patterns among isotopic, physiological, and climatic variables. As a result, an intra-annual pattern of ¹³C was identified, although the individual Δ^{13} C series showed low synchronism in their absolute values, a high interannual coherence was observed after the application of the first difference, indicating synchronized responses to year-on-year variations in precipitation, showing that water availability acts as the main driving factor of the isotopic composition of the wood. The results also indicate that the carbon assimilated in the year prior to the current growth, strongly conditioned by rainfall, constitutes the main source for wood formation.

Keywords: Carbon isotope; Tropical dendrochronology; Growth rings; Cedar.

INDICADORES DE IMPACTO

A pesquisa apresenta impacto científico, ambiental e metodológico ao ampliar o conhecimento sobre a resposta de espécies arbóreas tropicais às variações climáticas por meio da análise de isótopos estáveis de carbono em anéis de crescimento. A construção de uma cronologia anual de $\Delta^{13}\text{C}$ para *Cedrela fissilis* em Floresta Tropical Sazonalmente Seca demonstrou a sensibilidade do sinal isotópico às condições hidroclimáticas, especialmente à precipitação e ao déficit de pressão de vapor, destacando o potencial dessa abordagem como ferramenta complementar à dendrocronologia tradicional. Para questões ambientais, os resultados contribuem para a compreensão dos efeitos da disponibilidade hídrica, da temperatura e da demanda atmosférica sobre o funcionamento ecofisiológico das árvores, fornecendo informações relevantes para avaliar a vulnerabilidade de florestas tropicais sazonalmente secas diante do aumento da frequência e intensidade de eventos de seca e das mudanças climáticas. O estudo também reforça o potencial dos anéis de crescimento como registros naturais de condições ambientais passadas, especialmente em regiões com baixa disponibilidade de séries meteorológicas históricas. O trabalho se enquadra principalmente nas áreas temáticas Meio Ambiente, Tecnologia e Produção, e Educação. Os resultados estão alinhados sobretudo aos ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e ODS 15 (Vida Terrestre), além de apresentar relação indireta com o ODS 6 (Água Potável e Saneamento).

IMPACT INDICATORS

The research presents scientific, environmental, and methodological impacts by expanding knowledge of how tropical tree species respond to climatic variability through the analysis of stable carbon isotopes in tree rings. The development of an annual $\Delta^{13}\text{C}$ chronology for *Cedrela fissilis* in a Seasonally Dry Tropical Forest demonstrated the sensitivity of the isotopic signal to hydroclimatic conditions, particularly precipitation and vapor pressure deficit, highlighting the potential of this approach as a complementary tool to traditional dendrochronology. From an environmental perspective, the results contribute to understanding the effects of water availability, temperature, and atmospheric demand on tree ecophysiological functioning, providing relevant information for assessing the vulnerability of seasonally dry tropical forests to the increasing frequency and intensity of drought events and climate change. The study also reinforces the potential of tree rings as natural archives of past environmental conditions, especially in regions with limited availability of long-term meteorological records. The study is mainly related to the thematic areas of Environment, Technology and Production, and Education. Its results are primarily aligned with SDG 13 (Climate Action) and SDG 15 (Life on Land), while also showing an indirect connection with SDG 6 (Clean Water and Sanitation).

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Correlação de Pearson.....	29
---------------------------------------	----

LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Foto de um indivíduo de <i>Cedrela fissilis</i> Vell.....	19
Figura 2. A discriminação contra o ^{13}C ocorre durante a difusão e a assimilação de CO_2 . Os assimilados (CH_2O) são transportados para o câmbio, onde são incorporados à madeira, levando a assinatura de ^{13}C dos assimilados.....	22
Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. A área de estudo se encontra no Norte do estado de Minas Gerais, nas proximidades do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (46°W – 42°W e 17°S – 13°S).....	24
Figura 4. Climograma mensal.....	25
Figura 5. Processos da dendrocronologia.....	26
Figura 6. Fluxograma dos passos da extração de celulose.....	28
Figura 7. a) Discriminação isotópica de valor bruto ($\Delta^{13}\text{C}$). b) Discriminação isotópica com o cálculo da primeira diferença.....	31
Figura 8. a) Média da discriminação isotópica ($\Delta^{13}\text{C}$), ou Cronologia isotópica. b) Esforço amostral (n) ao longo da série cronológica.....	33
Figura 9. Correlações mensais entre a discriminação isotópica de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) em anéis de crescimento e variáveis climáticas (precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de pressão vapor) no período de 1994–2014. As barras representam os coeficientes de correlação mensais, considerando meses do ano corrente (t) e do ano anterior (t–1). Barras em azul indicam correlações estatisticamente significativas ($p < 0,05$), enquanto barras em cinza indicam correlações não significativas.....	34
Figura 10. Relações de precipitação, Temperatura, DVP e PDSI x $\Delta^{13}\text{C}$, em gráficos de dispersão linear.....	36

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Identificação dos indivíduos selecionados para o estudo.....27

Tabela 2. Correlação entre a cronologia isotópica $\Delta^{13}\text{C}$ e as variáveis climáticas (Precipitação, Temperatura, PDSI e DPV). As correlações foram comparadas entre os períodos do ano (anual, estação úmida – NDJF - e estação seca – AMJJAS) em diferentes janelas temporais (1920-2014; 1920-1944; 1945-1969; 1970-1994; 1995-2014).....37

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral	16
2.2. Objetivos Específicos.....	16
3. HIPÓTESES	17
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	17
4.1 Dendrocronologia tropical e Cedrela sp.	17
4.2 Isótopos Estáveis.....	19
4.3 Funcionamento dos isótopos na árvore.....	21
5. MATERIAL E MÉTODOS	23
5.1 Área de Estudo e Amostragem.....	23
5.2. Preparo das Amostras	27
5.3 Análise Isotópica de $\delta^{13}\text{C}$	28
5.4 Coleta e Tratamento de Dados Climáticos.....	28
5.5 Análise Estatística	29
5.5.1 Correlação $\delta^{13}\text{C}$ -Clima	29
5.5.2 Análise de Componentes Principais (PCA).....	30
5.5.3 Modelagem.....	30
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
7. CONCLUSÃO	33
8. REFERÊNCIAS.....	33

INTRODUÇÃO

A relevância dos ecossistemas terrestres no ciclo moderno do carbono (C) tem sido bastante demonstrada em muitos estudos. A forma que os ecossistemas respondem ao aumento do CO₂ atmosférico é ponto-chave para entender e controlar o ritmo das mudanças climáticas. As plantas, por sua vez, são fundamentais, pois os processos interligados de fotossíntese e respiração regulam as trocas de C entre a biosfera e a atmosfera. Dessa forma, o compartimento terrestre do orçamento global de C atua como um sumidouro crescente, responsável por absorver até um terço das emissões globais de combustíveis fósseis (Martinelli et al., 2021).

Nesse contexto, dentre os ecossistemas terrestres, as florestas tropicais se destacam uma vez que nos trópicos são encontrados os valores mais elevados de produção primária bruta (PPB), reflexo da elevada disponibilidade de energia e água. Além disso, a importância dessa região no ciclo global de C é intensificada pelo balanço líquido das mudanças no uso e cobertura da terra, que aumentam o fluxo de CO₂ entre a superfície terrestre e a atmosfera (Martinelli et al., 2021).

Os estudos de isótopos estáveis de carbono ($\delta^{13}\text{C}$) em anéis de crescimento tem crescido recentemente, permitindo investigar as respostas fisiológicas das árvores e reconstruir variáveis climáticas do passado. O $\delta^{13}\text{C}$ reflete a relação entre a concentração de CO₂ intercelular (C_i) e atmosférico (C_a), controlada principalmente pela condutância estomática e pela taxa fotossintética, sendo sensível a variações na disponibilidade hídrica, temperatura e DPV (Sleen, Zuidema e Pons, 2017).

Em regiões tropicais sazonalmente secas, a estação seca duradoura e as variações interanuais de precipitação causam muito estresse hídrico às espécies arbóreas. Nessas condições, ações fisiológicas como o fechamento parcial dos estômatos reduzem a perda de água, diminuem a razão C_i/C_a e levam a menor discriminação isotópica contra o ^{13}C , resultando em valores de $\delta^{13}\text{C}$ menos negativos nos anéis formados durante esses períodos (McCarroll e Loader, 2004; Rathgeber et al., 2022).

Esses marcadores isotópicos de carbono apresentam potencial para estudos ecológicos, agronômicos, de rastreabilidade e dendrocronológicos, uma vez que plantas que adotam diferentes vias fotossintéticas, como C₃ e C₄ (raros em espécies arbóreas e mais comum em gramíneas), apresentam razões $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ distintas. Essas diferenças

decorrem do fracionamento isotópico associado ao processo de fixação de carbono. Outrossim, a composição isotópica do carbono vegetal se caracteriza não só pelo metabolismo fotossintético, mas também por variáveis ambientais, condições edafoclimáticas, práticas agrícolas e demais fatores relacionados ao crescimento e desenvolvimento das plantas (Dong et al., 2019). Em termos isotópicos, espécies com metabolismo C3 apresentam valores de $\delta^{13}\text{C}$ entre -25 e -35‰ (média $\approx$ -27‰), e espécies C4 exibem valores entre -7 e -18‰ (média $\approx$ -11‰), diante do padrão Vienna PeeDee Belemnite – VPDB (Nardoto et al., 2020).

A construção de uma cronologia detalhada de $\Delta^{13}\text{C}$ permite identificar padrões de resposta da espécie a variáveis climáticas como precipitação, DPV, temperatura e índices de aridez. Assim, possibilitando estimar parâmetros ecofisiológicos, como a eficiência intrínseca do uso da água (iWUE), e compreender como a espécie adapta suas estratégias fisiológicas frente às condições impostas pela sazonalidade climática (Sleen, Zuidema e Pons, 2017). Ademais, fornece dados relevantes para reconstruções hidroclimáticas em áreas com baixa cobertura de registros meteorológicos históricos e servindo como subsídio para a conservação de florestas tropicais sazonalmente secas, ecossistemas particularmente vulneráveis às mudanças climáticas e à intensificação de eventos como secas prolongadas (Rathgeber, et al., 2022).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Desenvolver uma cronologia de $\Delta^{13}\text{C}$ a partir de séries de anéis de crescimento anuais de *Cedrela fissilis* Vell., proveniente do Norte do Estado de Minas Gerais, Brasil, para investigar as relações entre as variações isotópicas e as variáveis climáticas, bem como as estratégias fisiológicas da espécie em um ambiente de Floresta Tropical Sazonalmente Seca (FTSS).

2.2. Objetivos Específicos

Caracterizar o sinal temporal de $\Delta^{13}\text{C}$ em *Cedrela fissilis* e sua sensibilidade às condições climáticas sazonais e interanuais.

Identificar quais variáveis climáticas exercem maior controle sobre a variabilidade isotópica e em que períodos do ano esse controle é mais expressivo.

Avaliar o potencial do $\Delta^{13}\text{C}$ em anéis de crescimento como proxy climático e indicador de resposta fisiológica em florestas tropicais sazonalmente secas.

3. HIPÓTESES

3.1 As variações anuais no $\Delta^{13}\text{C}$ dos anéis de crescimento da *Cedrela fissilis* Vell. estarão significativamente correlacionadas com as variáveis climáticas que influenciam a disponibilidade de água e o estresse hídrico (precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de vapor de pressão).

3.2 A cronologia de $\Delta^{13}\text{C}$ da *Cedrela fissilis* Vell. fornecerá informações complementares às cronologias de largura de anéis, permitindo uma compreensão mais aprofundada das respostas da espécie às variações climáticas e fisiológicas.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Dendrocronologia tropical e *Cedrela* sp.

A dendrocronologia é a ciência que estuda os anéis de crescimento das árvores, com o objetivo de compreender processos biológicos, ecológicos e climáticos ao longo do tempo (Rodríguez, 2023). Seu desenvolvimento teve início no início do século XX, quando o pesquisador Andrew Ellicott Douglas iniciou estudos em Flagstaff, Arizona, uma região temperada e semiárida, onde os anéis anuais se formam de maneira bem definida (Sheppard, 2010). Os anéis se formam em resposta a fatores climáticos sazonais e a condições ambientais como variações de temperatura, períodos sem chuvas e eventos de inundação, por exemplo. Esses fatores podem provocar a dormência cambial, delimitando com clareza os anéis anuais. Além de permitir a determinação da idade das árvores, a dendrocronologia fornece informações sobre taxas de crescimento, respostas das florestas às mudanças climáticas e variações na produtividade de biomassa (Schöngart, et al., 2017).

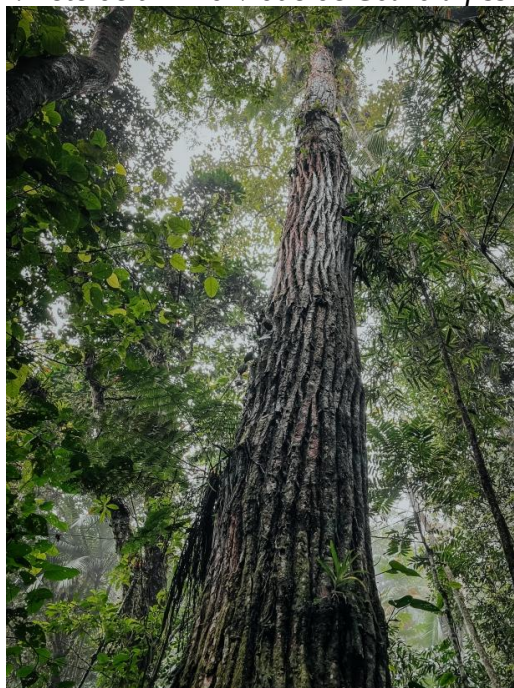
No Hemisfério Sul subtropical, os estudos dendrocronológicos tiveram início na década de 1980, utilizando angiospermas como *Cedrela lilloi* e *Juglans australis* e, a conífera *Araucaria angustifolia* (Schöngart, et al., 2017). Nas últimas décadas, a construção de cronologias a partir de séries de anéis de crescimento tem possibilitado importantes avanços em análises climáticas, antropológicas e ecológicas em biomas de clima tropical (Embrapa, 2022). Esses métodos têm contribuído para avaliar impactos climáticos recentes, como mostram nos trópicos, onde intensas secas reduziram em média 2,5% o crescimento lenhoso anual desde 1930, afetando a capacidade de sequestro de carbono e aumentando riscos de mortalidade arbórea (Zuidema, et al., 2025).

Apesar dos avanços, a dendrocronologia em regiões tropicais enfrenta desafios significativos. A grande diversidade anatômica das espécies, a complexidade dos sinais climáticos registrados na madeira e as dificuldades logísticas de acesso a áreas remotas limitam a construção de cronologias longas e precisas (Griffin et al., 2024). Diante disso, a seleção criteriosa de espécies com anéis anuais bem definidos, como as *Cedrela* sp., é indispensável. Amplamente distribuído nas Américas, esse gênero possui reconhecida capacidade de registrar variações sazonais de precipitação, sendo assim um gênero promissor para ampliar a aplicação da dendrocronologia nos trópicos (Pereira, et al. 2018).

O gênero *Cedrela* sp. apresenta alta sensibilidade a variáveis climáticas, como precipitação, umidade e fenômenos associados ao El Niño-Oscilação Sul, demonstrando correlações positivas com a precipitação em períodos de seca. Diversos estudos identificaram relação significativa entre a precipitação e o crescimento dos anéis dessas espécies, com destaque para os meses mais chuvosos (Santos, 2025; Rodriguez, 2023; Sousa, 2019; Granato-Souza et al., 2018; Pereira, 2018).

Entre as espécies desse gênero, *Cedrela fissilis* Vell. (Figura 1) se destaca por sua ampla distribuição na América do Sul e Central, ocorrendo em todos os biomas brasileiros, desde florestas tropicais úmidas e secas até savanas e ecossistemas montanhosos. Quando adulta, pode atingir cerca de 30 metros de altura e 1,5 metro de diâmetro, sendo classificada como espécie secundária tardia. Apresenta fenologia decídua, caracterizada pela queda das folhas durante a estação seca e pela brotação no início da estação chuvosa (Santos, 2025).

Figura 1. Foto de um indivíduo de *Cedrela fissilis* Vell.



Fonte: Maçaneiro, J. P. de (2025)

Além da ampla distribuição geográfica, a espécie reúne características favoráveis para estudos dendrocronológicos, como anéis de crescimento bem definidos, fenologia marcada, crescimento rápido e sistema radicular superficial, o que aumenta sua sensibilidade às variações na umidade do solo e na precipitação (Pereira, 2018). Anatomicamente, apresenta vasos com porosidade semicircular a circular e faixas conspícuas de parênquima marginal, o que facilita as análises dendrocronológicas (Fontana, 2024).

Diante dessas características, *Cedrela fissilis* se revela uma espécie promissora para estudos dendrocronológicos nos trópicos, possibilitando reconstruções hidroclimáticas, análises do clima passado e práticas voltadas ao manejo florestal sustentável.

4.2 Isótopos Estáveis

Os estudos e análises de isótopos estáveis em árvores iniciou após o desenvolvimento do IRMS (*Isotope Ratio Mass Spectrometry* - espectrometria de massa com relação isotópica). Harmon Craig foi pioneiro nos estudos com isótopos estáveis, onde analisou $\delta^{13}\text{C}$ em diversos materiais, incluindo amostras de madeira moderna e fóssil. Com isso, a dendrocronologia, ciência que estuda os anéis de crescimento de

árvores, passou a investigar o estudo de isótopos em anéis de árvores para realizar comparações com o tempo e a temperatura (Leavitt e Roden, 2022).

Durante as pesquisas realizadas nos séculos XX e XXI, pode-se afirmar que a dendrocronologia isotópica é uma ferramenta de potencial nos estudos de correlações climáticas (Leavitt e Roden, 2022). Roden e Ehleringer (2000) e Miller, et al. (2006), afirmaram que os anéis de crescimento de árvores servem como registros naturais e podem quantificar variações climáticas passadas que podem ser apresentados por séculos e até milênios, isto por meio de medições das larguras de anéis e análises de isótopos estáveis de celulose. Ademais, os isótopos estáveis além de reconstruir o clima passado, também compreende a hidrologia de isótopos, ecofisiologia das plantas e poluição (Leavitt, 2010)

A variação na composição de isótopos estáveis nos anéis de crescimento das árvores já foi meio de análise retrospectiva de mudanças ambientais em escala local, regional e global. Ainda, espécies de árvores com anéis visualmente indistintos, a variação sazonal na composição isotópica da madeira pode ser usada para delinear os anéis de crescimento das árvores (Sleen, Zuidema e Pons, 2017).

Carbono, Oxigênio e Hidrogênio, são os principais elementos encontrados na madeira, todos possuem isótopos estáveis (não radioativos). O carbono, por sua vez, apresenta dois isótopos estáveis, sendo estes, ^{12}C (representam aproximadamente 98,89% do total) e ^{13}C (com cerca de 1,1% do total). Ambos possuem 6 prótons, mas com número de nêutrons diferentes, o ^{12}C com 6 nêutrons e o ^{13}C com 7 nêutrons (MCCaroll e Loader, 2004). Essa diferença de massa faz com que os isótopos sejam discriminados de maneira distinta durante o processo de fotossíntese.

O fracionamento isotópico resulta em variações mensuráveis na razão isotópica do carbono presente na madeira. Essas variações caracterizam as condições ambientais em que a planta cresceu, em especial, corresponde à disponibilidade hídrica e à eficiência do uso da água. Nesse caso, o sinal isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ é aplicado como proxy ambiental em estudos de reconstrução paleoclimática, assim como é visto em dendroclimatologia (Bird, 2020)

A razão entre os isótopos ^{13}C e ^{12}C no CO_2 atmosférico tem o valor de $\delta^{13}\text{C}$ em torno de -8‰, comparado ao VPDB, que é o padrão internacional. Já os tecidos vegetais,

indicam valores isotópicos mais negativos, variando entre -20‰ e -30‰. Dessa forma, ocorre uma deficiência de ^{13}C nos compostos orgânicos das plantas em relação ao CO_2 atmosférico. Portanto, o fracionamento isotópico é a diferença entre a composição isotópica da atmosfera e do tecido vegetal. Este é influenciado por condições ambientais (Kohn, 2010; McCarroll e Loader, 2004).

4.3 Funcionamento dos isótopos na árvore

A formação dos anéis de crescimento das árvores depende exclusivamente das atividades de divisão celular do câmbio com influência dos fatores ambientais, dessa forma, as células do xilema e floema tomam estruturas anatômicas e características isotópicas diferentes em cada espécie (Burger e Richter, 1991).

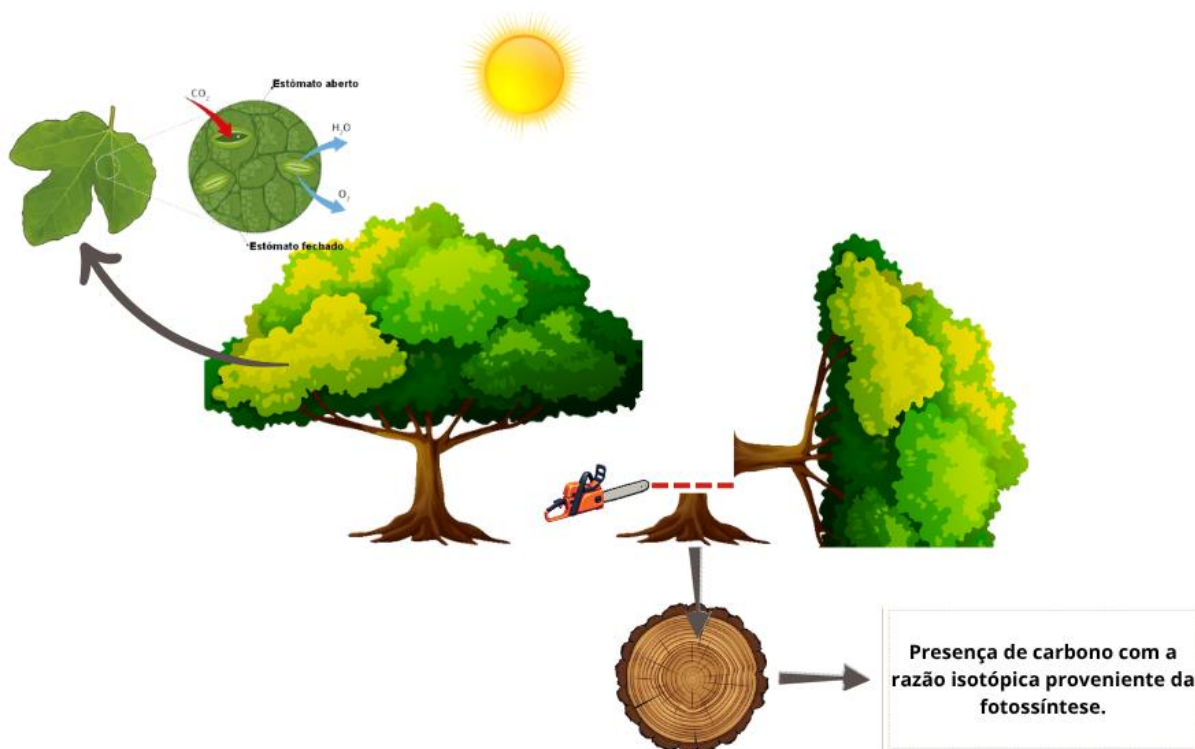
O processo de xilogênese destaca a divisão celular, expansão, deposição da parede secundária e maturação das células do xilema, as quais são controladas por fatores genéticos, sinais hormonais e principalmente por condições ambientais como temperatura e disponibilidade hídrica. Este processo está inteiramente ligado à fenologia cambial, onde o mesmo passa por atividades de sazonalidade que comprometem a formação do lenho em relação à formação das folhas, raízes e reservas (Rathgeber, et al., 2022).

Durante a troca gasosa realizada pelos estômatos das folhas, as plantas capturam CO_2 da atmosfera e liberam oxigênio (O_2) como subproduto da fotossíntese. Nesse processo, o isótopo mais leve e abundante do carbono (^{12}C) é absorvido preferencialmente em relação ao isótopo mais pesado e menos abundante (^{13}C). Essa diferença na incorporação dos isótopos é conhecida como discriminação isotópica. Em condições ambientais com restrição hídrica ou alta temperatura os estômatos tendem a fechar parcialmente para evitar muita perda de água, reduzindo assim, a entrada de CO_2 conseqüentemente, e incorporando mais ^{13}C (Figura 2), essa incorporação é feita pela enzima RuBisCO (ribulose-1,5-bifosfato carboxilase-oxigenase) (Sleen, Zuidema e Pons, 2017).

O carbono fixado, ^{12}C e/ou ^{13}C , é convertido em açúcares e transportado para o corpo da árvore, como o câmbio vascular. Os açúcares como a glicose são componentes usados para formação da parede celular do crescimento secundário, ou seja, para formação das células de xilema principalmente. No entanto, os componentes da parede

celular (Celulose, Hemiceluloses e Lignina) apresentam carbono com a razão isotópica proveniente da fotossíntese (Rathgeber, et al., 2022).

Figura 2. A discriminação contra o ^{13}C ocorre durante a difusão e a assimilação de CO_2 . Os assimilados (CH_2O) são transportados para o câmbio, onde são incorporados à madeira, levando a assinatura de ^{13}C dos assimilados.



Fonte: Autor, 2025.

Assim, o valor de $\Delta^{13}\text{C}$ presente na madeira (parede celular das células de xilema) faz referência às condições ambientais e fisiológicas do período em que o anel de crescimento foi formado. Quanto mais estresse hídrico por ambiente muito seco, o valor de $\Delta^{13}\text{C}$ é menos negativo (maior quantidade de ^{13}C), adverso de, quanto mais úmido e iluminado o ambiente, o valor de $\Delta^{13}\text{C}$ é mais negativo (menor quantidade de ^{13}C), pois incorpora mais ^{12}C (Sleen, Zuidema e Pons, 2017).

A discriminação isotópica do carbono durante a assimilação de CO_2 pelas plantas pode ser descrita pela seguinte equação:

$$\Delta^{13}\text{C} = a + (b - a) \cdot \frac{c_i}{c_a} \quad (\text{‰})$$

Em que C_i representa a concentração de CO_2 intercelular e C_a a concentração de CO_2 atmosférico. O parâmetro “a” corresponde à discriminação associada à difusão do CO_2 através dos estômatos, com valor aproximado de 4,4‰, enquanto “b” representa a

discriminação isotópica associada à fixação do carbono pela enzima Rubisco, estimada em cerca de 27‰ (Farquhar et al., 1989).

A discriminação contra ^{13}C ocorre durante a difusão e a assimilação de CO_2 . Os carboidratos assimilados (CH_2O) são transportados para o câmbio onde são incorporados na madeira, neste, está a presença do ^{13}C e/ou ^{12}C . A atividade cambial progressiva constrói um arquivo das mudanças temporais nos processos mencionados acima durante a vida da árvore (Sleen, Zuidema e Pons, 2017).

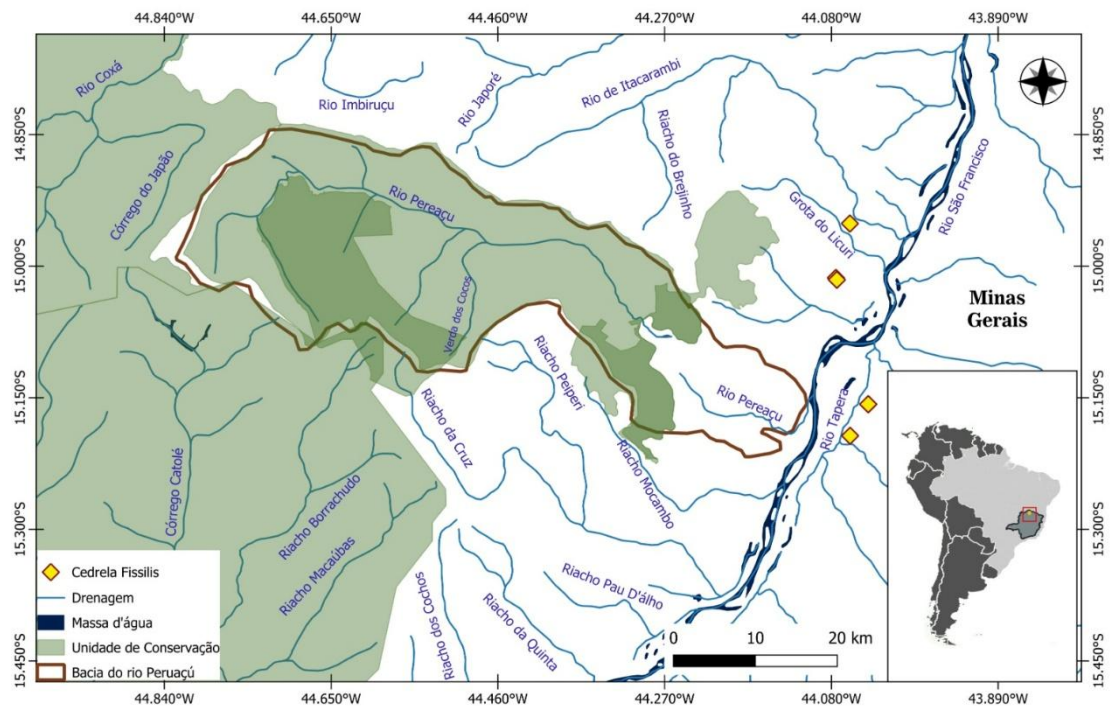
Com a razão de C_i/C_a que tende a diminuir em condições de baixa disponibilidade hídrica, quando ocorre o fechamento dos estômagos, sucede o aumento da iWUE , já que a planta reduz a perda de água pela transpiração sem comprometer completamente a absorção de CO_2 (Sleen, Zuidema e Pons, 2017). O autor acrescenta ainda, que a redução de C_i dispõe de uma menor discriminação isotópica de ^{13}C em culturas agrícolas e em espécies arbóreas. Esses resultados confirmam que o $\delta^{13}\text{C}$ é um bom indicador da disponibilidade de água, pois reflete o controle dos estômatos e as respostas da planta à variação da umidade.

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de Estudo e Amostragem

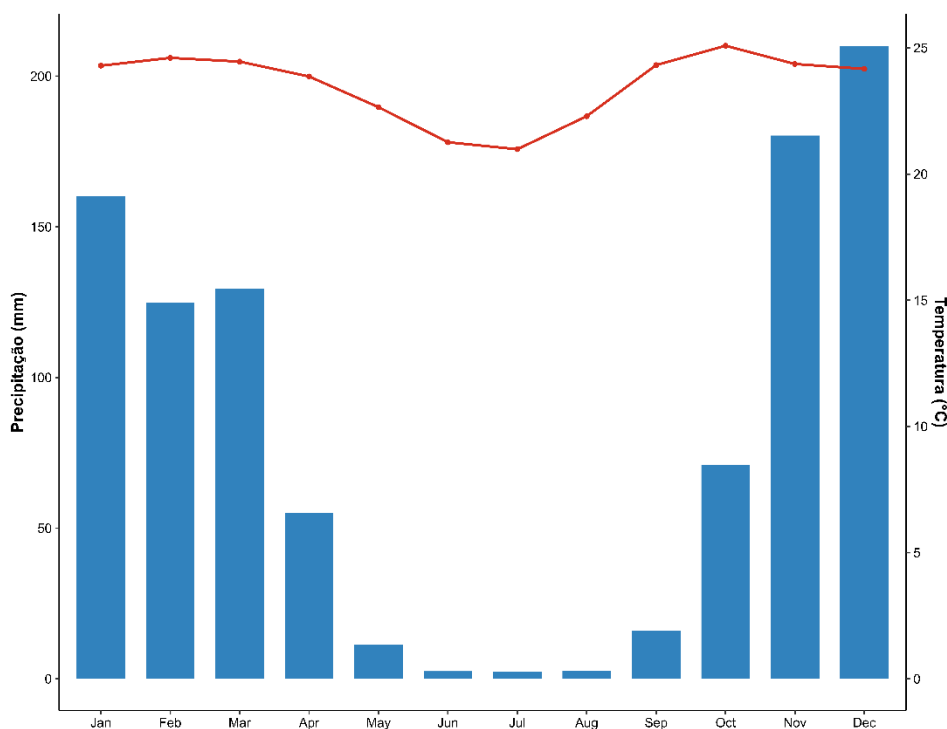
A área de estudo consiste em fragmento de Floresta Tropical Sazonalmente Seca, localizada na bacia do rio São Francisco, Norte do estado de Minas Gerais, Brasil (Figura 3).

Figura 3. Mapa de localização da área de estudo. A área de estudo se encontra no Norte do estado de Minas Gerais, nas proximidades do Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (46°W – 42°W e 17°S – 13°S).



Fonte: Do autor (2025).

Figura 4. Climograma mensal.



Fonte: Do autor (2025).

O clima desta área é de transição entre os tipos Aw (tropical com estação seca no inverno) e BSh (semiárido quente), com base nos dados do período climatológico normal (1961–1990) da estação meteorológica mais próxima (Caririnha-BA, ID: 83408). A precipitação média anual é de 814 mm, principalmente entre os meses de outubro e março, que correspondem à estação chuvosa, com cerca de 90,7% da precipitação anual. Os meses de junho a agosto apresentam os menores índices pluviométricos, com médias inferiores a 7 mm mensais, segundo a Classificação Climática de Köppen.

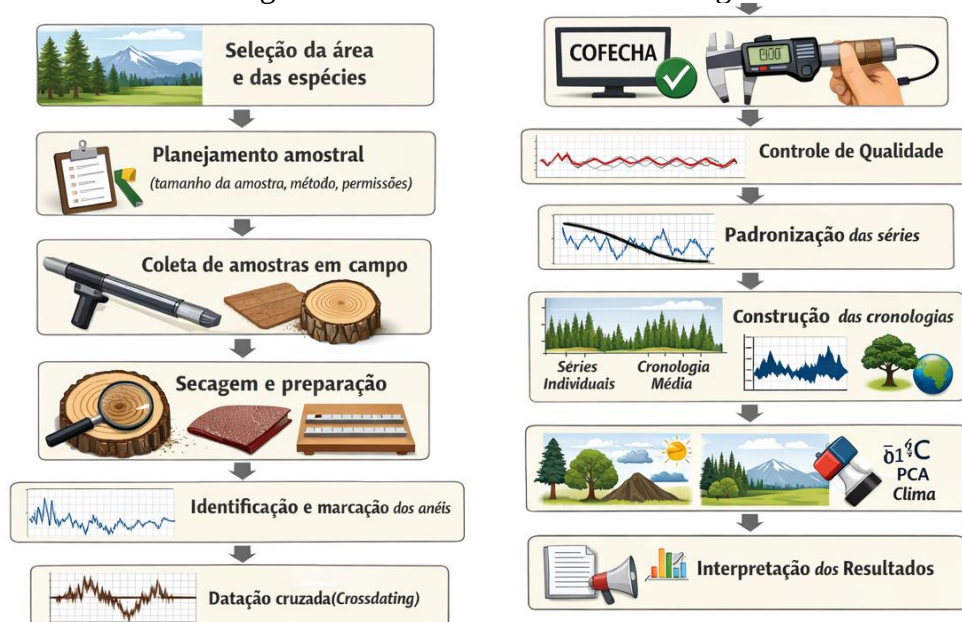
Nas FTSS, a sazonalidade climática sincroniza com os padrões de crescimento e reprodução das espécies vegetais. Isto é, a produção foliar está inteiramente ligada com a disponibilidade de umidade no solo. Diante disso, o crescimento secundário de espécies decíduais, como a *Cedrela fissilis* ocorre durante a estação chuvosa, assim formando madeira inicial. Em período de seca, essa espécie entra em dormência cambial, dessa forma perdendo suas folhas e assim diminuindo sua atividade fotossintética, consequentemente economizando mais água pela redução da troca gasosa (Santos, 2025).

Em 2018 foi desenvolvida uma cronologia de anéis de crescimento de *C. fissilis* na área de estudo (Pereira, 2018). A cronologia de largura de anéis, BRA002, se estendeu

de 1882-2017 e apresentou forte correlação com variáveis climáticas e hidrológicas, revelando o potencial da espécie e das FTSS para estudos dendrocronológicos.

O estudo dendrocronológico consiste em etapas sequenciais que incluem a coleta de amostras em campo, a preparação e secagem do material, a identificação e marcação dos anéis de crescimento, a realização da datação cruzada por meio do *skeleton plot*, a mensuração da largura dos anéis utilizando o sistema LINTAB, a verificação estatística da datação no software COFECHA, o controle de qualidade e a padronização das séries, culminando na construção das cronologias dendrocronológicas (Figura 5).

Figura 5. Processos da dendrocronologia.



Fonte: Do autor (2025).

A cronologia atualmente contribui para o banco internacional de dados paleoclimáticos de anéis de crescimento de árvores (Pereira, et al., 2018). As amostras fazem parte da coleção permanente do Laboratório de Dendrocronologia da UFLA (DENDROTECA), sendo conservadas e armazenadas para estudos futuros.

A dendrocronologia tradicional requer uma amostragem de 10 a 20 árvores por local para obter adequadamente os sinais ambientais em regiões temperadas, enquanto, em áreas tropicais, o esforço amostral necessário é maior, o dobro de indivíduos. Para os registros isotópicos, a amostragem pode ser menor, até mesmo em uma única árvore. Diante disso, a preparação química e a análise isotópica requer maior tempo, compensando a menor quantidade de amostras necessárias, contudo, séries isotópicas

ainda necessitam de maior tempo para serem desenvolvidas do que séries baseadas na largura dos anéis (Leavitt, 2010).

Para este estudo, foram selecionados de seis indivíduos de *Cedrela fissilis*, da cronologia BRA002 (Pereira, 2018), selecionados com base na correlação entre indivíduos, comprimento das séries e largura média dos anéis de crescimento que permitam a remoção de material para análises isotópicas (Tabela 1).

Tabela 1. Identificação dos indivíduos selecionados para o estudo.

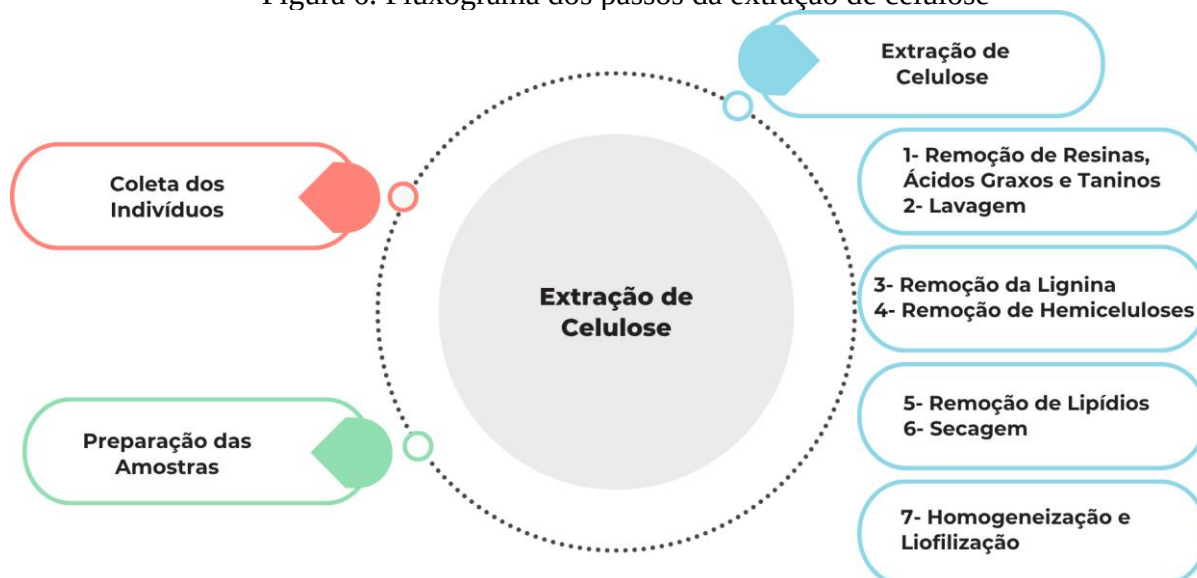
Código	Indivíduos	Datação
1-163	PNP001A	1851-2017
164-284	PNP002B	1851-2017
285-363	PNP007B	1924-2010
364-448	PNP012B	1924-2012
449-547	PNP014B	1914-2000
548-668	PNP015B	1893-2010

Fonte: Do autor (2025).

5.2. Preparo das Amostras

Para a análise isotópica, as amostras de madeira foram preparadas para a extração de α -celulose seguindo a metodologia aplicada por Wieloch et al. (2011), adaptada por Roel Brien e editado por Jess Baker e Sarah Hunt. Segue as seguintes etapas (Figura 4).

Figura 6. Fluxograma dos passos da extração de celulose



Fonte: Do autor (2025).

Segundo Cullen e Macfarlane (2005), o uso da celulose em vez da madeira in natura se dá por ser um material imóvel, ao contrário de outros materiais da madeira. A avaliação de um único componente também reduz a variabilidade das assinaturas isotópicas, já que diferentes constituintes da madeira apresentam assinaturas distintas devido às suas vias biossintéticas.

5.3 Análise Isotópica de $\delta^{13}\text{C}$

A análise isotópica foi realizada no Laboratório de Ecologia Isotópica no Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo (CENA/USP). Onde, as α -celuloses de cada parte do anel foram pesadas, até 3,200 mg aproximadamente, em uma cápsula (Standard Weight 8 x 5mm) de estanho e submetido a uma combustão em alta temperatura 1020°C (Schleser, 2022) em fluxo contínuo de hélio, para a determinação da composição isotópica por espectrometria de massa de razão isotópica (IRMS), utilizando um analisador elementar acoplado. O CO_2 gerado é purificado e direcionado ao IRMS para determinação da razão $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Os resultados foram expressos na notação delta ($\delta\text{‰}$), com referência ao padrão Sugarcane (Padrão estabelecido pelo CENA com base no padrão internacional VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite)).

5.4 Coleta e Tratamento de Dados Climáticos

Para avaliar a influência do clima sobre os sinais isotópicos registrados nos anéis de crescimento de *Cedrela fissilis*, os valores obtidos de $\delta^{13}\text{C}$ foram correlacionados com as variáveis meteorológicas como precipitação, temperatura do ar, índice de severidade

de seca de Palmer (PDSI) e pressão de vapor (VP). Os dados foram obtidos a partir do conjunto de dados CRU TS v4.08, desenvolvido pelo Climate Research Unit (University of East Anglia). As séries correspondem à média espacial de uma janela geográfica delimitada pelas coordenadas 46°W–42°W e 17°S–13°S (Figura 3), abrangendo a área de estudo do norte de Minas Gerais, Brasil.

O déficit de pressão de vapor (DVP) foi estimado a partir dos dados de temperatura do ar e pressão real de vapor, utilizando a relação entre a pressão de vapor de saturação e a pressão de vapor observada. A pressão de saturação (e_s , em hPa) foi calculada segundo a formulação de Tetens, dada por $e_s = 6,112 \times \exp(T + 237,517,67 \cdot T)$, onde T representa a temperatura do ar em °C. O DVP (hPa) foi então obtido pela diferença entre a pressão de saturação e a pressão real de vapor (e_a): $VPD = e_s - e_a$.

Esse procedimento foi aplicado a toda a série climática, permitindo a obtenção de uma estimativa contínua da demanda evaporativa atmosférica ao longo de todo o período de estudo. Os dados climáticos foram obtidos por meio da plataforma KNMI Climate Explorer, que disponibiliza as séries do conjunto CRU TS v4.08.

As análises de correlação climática foram conduzidas para o intervalo 1920–2014, uma vez que a confiabilidade espacial e temporal dos dados meteorológicos é consideravelmente maior a partir do início do século XX, especialmente em regiões com menor densidade histórica de estações meteorológicas.

5.5 Análise Estatística

5.5.1 Correlação $\delta^{13}\text{C}$ -Clima

Para análises de Correlação $\delta^{13}\text{C}$ -Clima, foi observado se as variações no $\delta^{13}\text{C}$ dos anéis acompanham mudanças em precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de pressão de vapor.

Com a coleta e tratamento de dados climáticos, foi feita a correlação de variáveis climáticas utilizando análise de correlação de Pearson (Equação 1) seguindo os critérios propostos por Pearson (1895) e regressão linear.

Equação 1.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

Onde, X_i são os valores da primeira variável, como o $\Delta^{13}\text{C}$ de cada ano; Y_i são os valores da segunda variável, como a precipitação anual, por exemplo; $\bar{X}$ é a média de X e $\bar{Y}$ é a média de Y ; n são os números de observações.

Posteriormente, exploradas defasagens temporais (“lags”), correlacionando $\delta^{13}\text{C}$ de um ano com o clima do mesmo ano e do ano anterior. O intuito foi identificar se a espécie responde ao clima da estação anterior.

5.5.2 Análise de Componentes Principais (PCA)

Foi realizada a análise dos componentes principais (PCA) usando o software R (versão 4.5.1; R Core Team 2025) a fim de identificar padrões nas relações entre $\Delta^{13}\text{C}$, clima e variáveis fisiológicas e descobrir quais variáveis mais explicam as variações observadas. As matrizes de dados foi construída com $\Delta^{13}\text{C}$ anual, C_i/C_a e a variáveis climáticas médias (precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de vapor de pressão).

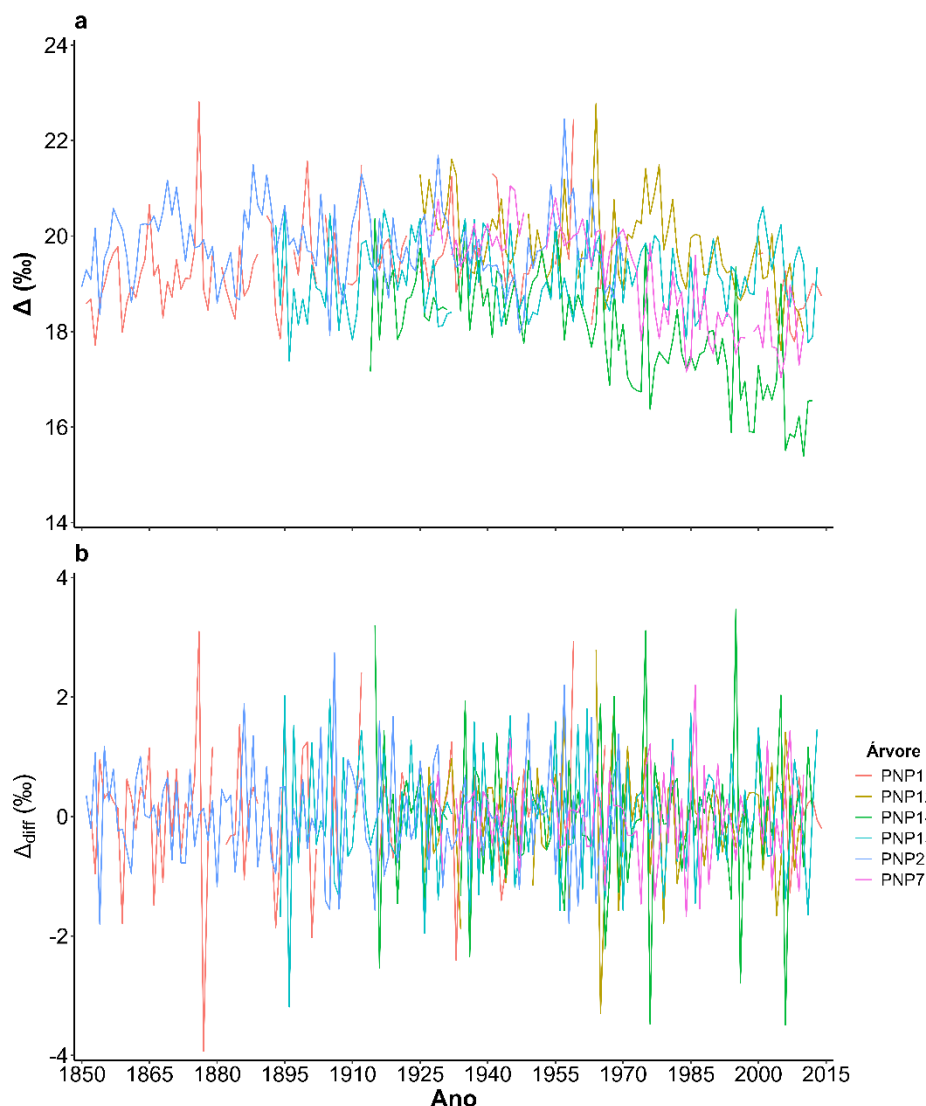
5.5.3 Modelagem

A partir dos resultados iniciais, foi feita uma modelagem para quantificar a influência de variáveis como precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de vapor de pressão sobre o $\Delta^{13}\text{C}$, incorporando tanto efeitos fixos quanto aleatórios, como os modelos empíricos (GLMM/LMM). O modelo mecanístico, baseado na equação de Farquhar, integra processos de fotossíntese para simular a resposta isotópica em diferentes cenários climáticos e níveis de CO_2 atmosférico. Por fim, esta análise aumentará a confiabilidade dos resultados obtidos.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discriminação isotópica do carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) das árvores analisadas apresentaram variação interanual observado ao longo do período de estudo, em contraste com os resultados apresentado por Farrapo (2019).

Figura 7. a) Discriminação isotópica de valor bruto ($\Delta^{13}\text{C}$). b) Discriminação isotópica com o cálculo da primeira diferença.



Fonte: Do autor (2025).

As séries de discriminação isotópica do carbono analisadas neste estudo não apresentaram elevada coerência entre si, entendendo-se que as espécies investigadas respondem de forma individualizada às condições ambientais. Essa baixa sincronia entre espécies (Figura 7a) sugere que fatores intrínsecos, como diferenças fisiológicas, estratégias de uso da água, arquitetura foliar e profundidade do sistema radicular, exercem influência relevante sobre o sinal isotópico registrado nos anéis de crescimento; ademais, a estrutura da folha interfere na condutância do mesófilo, durante a difusão do CO_2 , desde os espaços intercelulares até a fixação pela Rubisco.

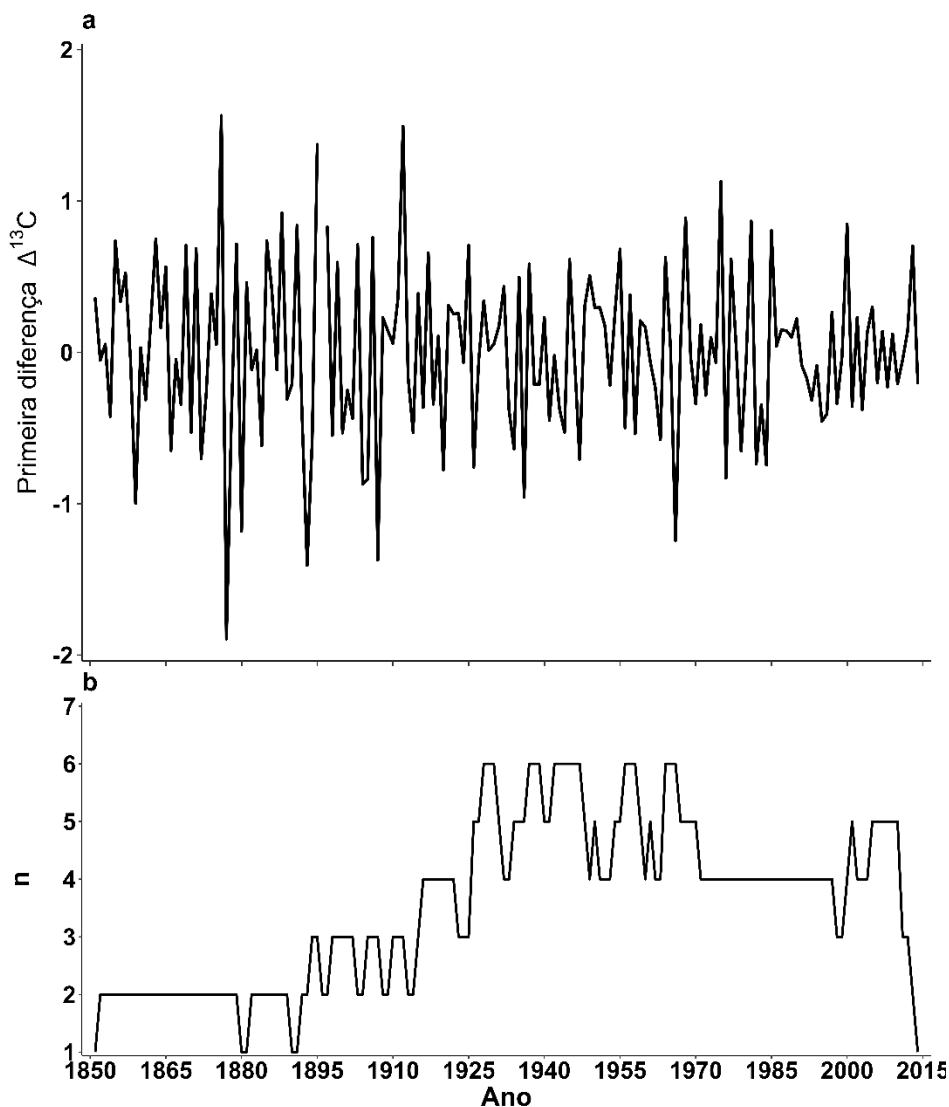
Mesmo sob as mesmas condições climáticas, os indivíduos podem apresentar diferenças na assimilação de carbono, na condutância estomática e na concentração interna de CO₂, o que pode resultar em diferentes valores de $\Delta^{13}\text{C}$ (von Caemmerer & Evans, 2014). Além disso, características das folhas podem influenciar tanto a composição isotópica do carbono quanto a forma como as plantas utilizam a água. No entanto, após a aplicação da primeira diferença, evidenciou-se elevada sincronia interanual, associada à precipitação. Nesse caso, a disponibilidade hídrica atua como um fator climático comum, capaz de modular a resposta ecofisiológica das diferentes espécies, ainda que de forma não sincronizada (McCarroll & Loader, 2004).

A remoção das tendências de longo prazo por meio do cálculo da primeira diferença realçou a variabilidade interanual de alta frequência e promoveu maior sincronia entre as séries individuais (Figura 7b). Posteriormente, os valores de $\Delta^{13}\text{C}$ passaram a apresentar comportamento mais coerente entre os indivíduos, observando a presença de um controle ambiental comum sobre a discriminação isotópica.

O aumento da sincronização após a aplicação da primeira diferença sugere que a variabilidade observada está associada à influência climática, em detrimento de respostas individuais, que é observado em registros isotópicos de carbono em ambientes tropicais e subtropicais, nos quais o $\Delta^{13}\text{C}$ responde de forma sensível às variações nas condições atmosféricas e fisiológicas, especialmente aquelas relacionadas à disponibilidade hídrica (Foroozan et al., 2018).

Apesar da elevada variabilidade individual, a cronologia média preserva um sinal climático agregado, reforçando o potencial do $\Delta^{13}\text{C}$ como proxy ambiental, especialmente quando analisado em conjunto com variáveis climáticas instrumentais (Figura 7). Resultados semelhantes foram reportados por McCarroll & Loader (2004) que demonstraram que, mesmo com baixa sincronização entre indivíduos, o sinal isotópico médio mantém relevância para estudos paleoclimáticos e ecofisiológicos.

Figura 8. a) Média da discriminação isotópica ($\Delta^{13}\text{C}$), ou Cronologia isotópica.
b) Esforço amostral (n) ao longo da série cronológica.



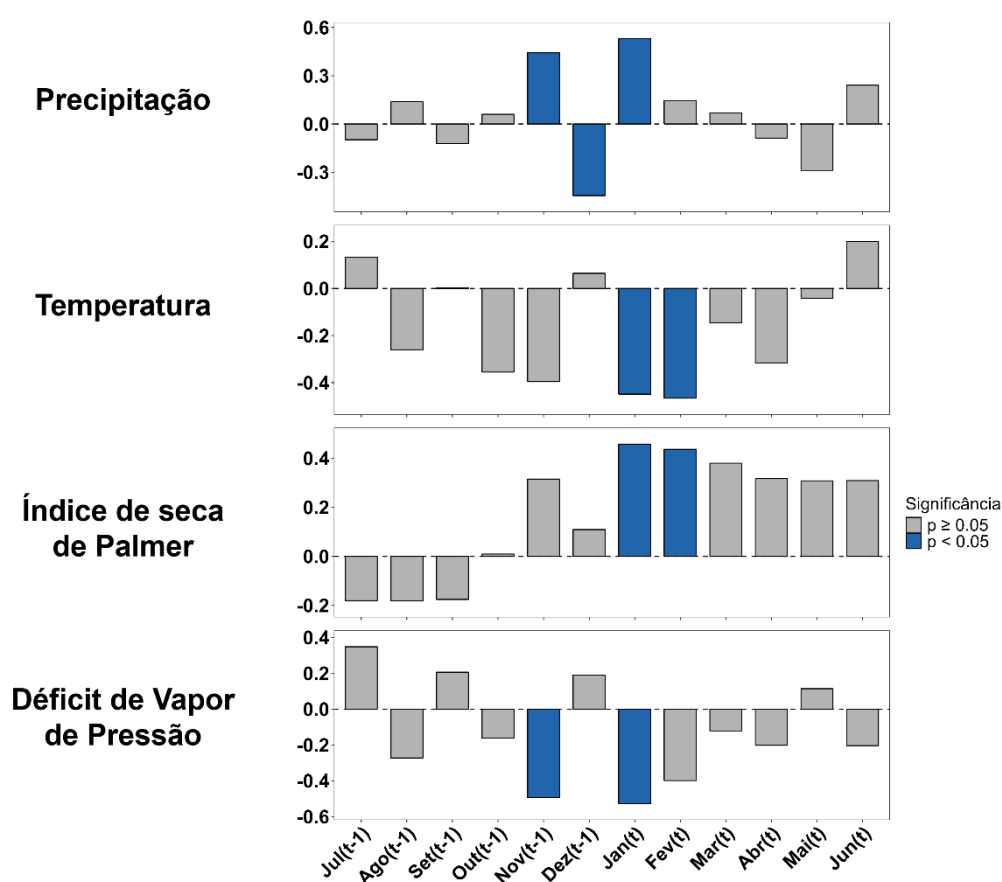
Fonte: Do autor (2025).

O período úmido na região de estudo, se estende de novembro do ano anterior ($t-1$) até março do ano corrente (t). Apesar disso, os padrões de correlação mensal indicam que o sinal climático mais consistente na cronologia de $\Delta^{13}\text{C}$ concentra-se no período que se estende de novembro ($\text{Nov}_{(t-1)}$) a fevereiro ($\text{Fev}_{(t)}$), sugerindo que essa janela sazonal exerce um controle sobre os processos ecofisiológicos registrados nos anéis (Figura 8).

As primeiras chuvas ajudam a reidratar os tecidos, aumentar a água disponível no solo e favorecer a formação de novas folhas, a retomada da atividade cambial e, consequentemente o crescimento da madeira. Essa resposta pode ser mais intensa quando a emissão de folhas ocorre junto com o aumento da disponibilidade de água e da atividade

foto-sintética. No entanto, o período de emissão das folhas pode variar entre as espécies e também depender das reservas de carboidratos armazenadas nos caules e nas raízes. Assim é possível observar que as espécies respondem a uma mesma janela climática, mas não necessariamente com a mesma intensidade ou no mesmo momento.

Figura 9. Correlações mensais entre a discriminação isotópica de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) em anéis de crescimento e variáveis climáticas (precipitação, temperatura do ar, índice de seca de Palmer e déficit de pressão vapor) no período de 1994–2014. As barras representam os coeficientes de correlação mensais, considerando meses do ano corrente (t) e do ano anterior (t-1). Barras em azul indicam correlações estatisticamente significativas ($p < 0,05$), enquanto barras em cinza indicam correlações não significativas.



Fonte: Do autor (2025).

Nesse intervalo (Nov_(t-1) – Fev_(t)), observam-se correlações significativas com variáveis associadas à disponibilidade hídrica e à demanda evaporativa da atmosfera (Figura 9). A discriminação isotópica de carbono apresenta associação positiva com a precipitação no final da estação seca/início da estação chuvosa, indicando maior $\Delta^{13}\text{C}$ sob condições mais úmidas, compatível com aumento da condutância estomática. Em

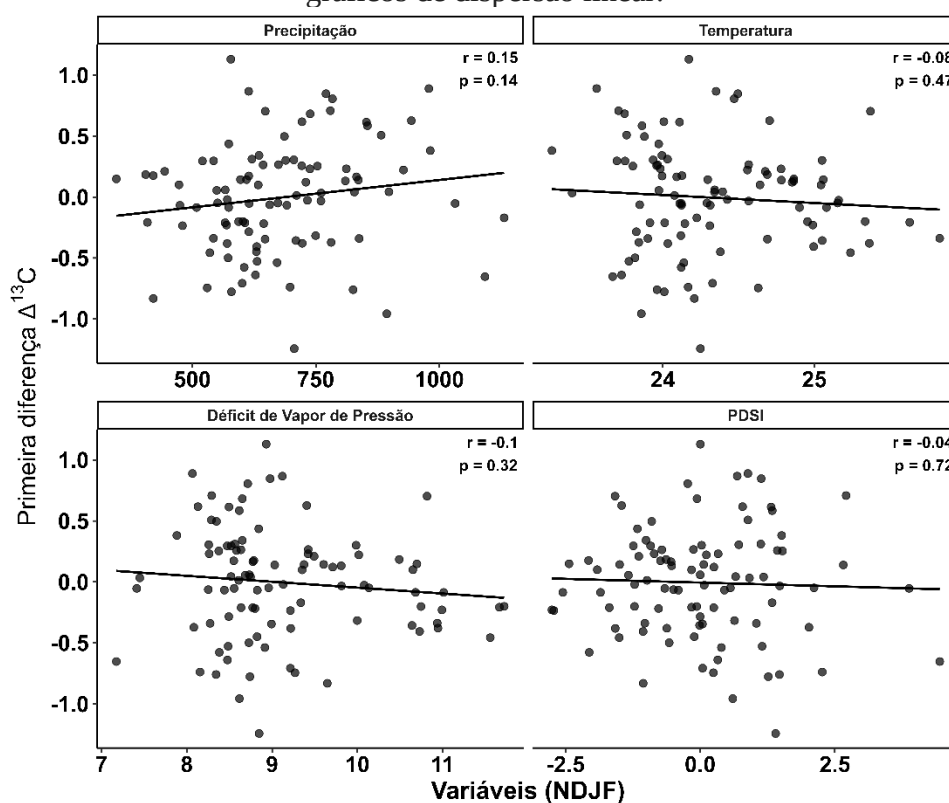
contraste, surgem correlações negativas com o déficit de pressão de vapor (DPV) principalmente entre novembro e janeiro, evidenciando redução da discriminação sob maior demanda evaporativa, o que reflete limitação estomática ao fluxo de CO₂.

A sensibilidade a esse processo não é uniforme entre as espécies. Algumas árvores fecham os estômatos mais cedo para reduzir a perda de água, enquanto outras conseguem manter a transpiração por mais tempo quando há água disponível no solo. Estudos com espécies tropicais demonstram que essas diferenças podem estar relacionadas a características como densidade da madeira, anatomia do xilema, fenologia e tolerância ao estresse hídrico (Wright et al., 2021).

As correlações negativas com a temperatura do ar durante esse período (Jan_(t) e Fev_(t)), foram mais fracas e provavelmente refletem, ao menos parcialmente, um efeito indireto mediado pelo DPV (Figura 9b,d). Temperaturas mais altas aumentam o DPV quando a umidade do ar não aumenta na mesma proporção. Assim, a relação negativa entre $\Delta^{13}\text{C}$ e temperatura pode estar mais ligada ao aumento da demanda atmosférica e ao fechamento dos estômatos do que a um efeito direto da temperatura sobre a assimilação de carbono. Estudos com árvores tropicais mostram que a resposta da fotossíntese à temperatura também depende das mudanças no DPV e da redução da abertura estomática.

Esse mecanismo justifica por que o DPV pode restringir a atividade fisiológica mesmo durante a estação chuvosa. A ocorrência de precipitação não garante que os estômatos permaneçam abertos durante todo o período, pois a água disponível no solo representa a oferta hídrica, enquanto o DPV expressa a demanda atmosférica. Assim, dias ou meses chuvosos, porém quentes e com elevada demanda evaporativa, podem produzir restrição estomática. Os resultados, portanto, indicam que a resposta isotópica depende do equilíbrio entre a água disponível no solo e a capacidade da atmosfera de retirar água das folhas.

Figura 10. Relações de precipitação, Temperatura, DVP e PDSI x $\Delta^{13}\text{C}$, em gráficos de dispersão linear.



Fonte: Do autor (2025).

Os resultados indicam que a variabilidade interanual da discriminação isotópica do carbono nas árvores analisadas é predominantemente controlada pela precipitação (Figura 10). Farrapo (2019) observou que a temperatura seguiu padrão semelhante ao da precipitação, atuando em conjunto como fator propulsor das variações de $\Delta^{13}\text{C}$ em biomas como Amazônia. Ademais, a autora destaca a variável de precipitação como propulsora da discriminação isotópica em FTSS.

Em conjunto, os resultados afirmam que a transição para a estação chuvosa e o auge do período úmido (novembro–fevereiro) constituem a fase de maior sensibilidade climática do sinal isotópico, quando o balanço entre oferta de água no solo e demanda atmosférica regula fortemente a abertura estomática e, consequentemente, a assinatura de $\Delta^{13}\text{C}$ registrada nos anéis de crescimento.

O ano hidrológico foi subdividido em dois períodos sazonais com base na resposta climática observada nas séries isotópicas. O período úmido foi definido como novembro a fevereiro (NDJF), enquanto o período seco compreendeu abril a setembro (AMJJAS).

Essa definição não seguiu apenas a climatologia regional média, mas foi empiricamente orientada, uma vez que foram nesses intervalos sazonais que se observaram as correlações estatisticamente mais consistentes entre a discriminação isotópica de carbono ($\Delta^{13}\text{C}$) e as variáveis climáticas analisadas.

Assim, a delimitação dos períodos reflete a janela temporal de maior sensibilidade climática do sinal isotópico, indicando que os processos fisiológicos registrados nos anéis de crescimento respondem de forma mais pronunciada às condições hidroclimáticas desses meses.

Tabela 2. Correlação entre a cronologia isotópica $\Delta^{13}\text{C}$ e as variáveis climáticas (Precipitação, Temperatura, PDSI e DPV). As correlações foram comparadas entre os períodos do ano (anual, estação úmida – NDJF - e estação seca – AMJJAS) em diferentes janelas temporais (1920-2014; 1920-1944; 1945-1969; 1970-1994; 1995-2014).

PRECIPITAÇÃO	ANUAL	ÚMIDA	SECA
1920–2014	0.08	0.15	-0.01
1920–1944	-0.13	0.00	-0.50*
1945–1969	0.04	0.42*	0.03
1970–1994	0.14	-0.07	0.32
1995–2014	0.44*	0.46*	-0.02
TEMPERATURA			
1920–2014	-0.08	-0.08	-0.09
1920–1944	0.20	-0.07	0.30
1945–1969	-0.44*	-0.29	-0.35
1970–1994	-0.06	0.16	-0.18
1995–2014	-0.13	-0.48*	-0.10
ÍNDICE DE SECA DE PALMER			
1920–2014	0.03	-0.04	0.02
1920–1944	-0.16	-0.07	-0.26
1945–1969	0.16	0.05	0.13
1970–1994	-0.02	-0.21	0.01
1995–2014	0.33	0.37	0.33

DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR			
1920–2014	-0.07	-0.10	-0.05
1920–1944	0.07	-0.13	0.14
1945–1969	-0.33	-0.25	-0.34
1970–1994	0.01	0.10	0.07
1995–2014	-0.24	-0.67*	-0.30
*p<0.05			

Fonte: Do autor (2025).

A tabela 2 apresenta os valores de correlação entre a cronologia de discriminação isotópica e as variáveis climáticas analisadas, em escala anual e segmentada em janelas temporais. A precipitação mostra as associações mais consistentes, com correlações positivas significativas durante a estação úmida nos períodos de 1945–1969 ($r = 0,42$; $p < 0,05$) e 1995–2014 ($r = 0,46$; $p < 0,05$), além de correlação anual significativa no período mais recente ($r = 0,44$). Esses resultados indicam um fortalecimento do controle hídrico nas últimas décadas. Em contraste, a precipitação da estação seca e o índice de seca de Palmer apresentaram correlações fracas. A temperatura e o déficit de vapor de pressão apresentaram correlações negativas, com destaque para o período de 1995–2014, no qual a temperatura e o VPD da estação úmida apresentaram correlações negativas significativas, significando o aumento da demanda evaporativa e maior restrição fisiológica mesmo em períodos chuvosos.

Os resultados demonstram que a transição para a estação chuvosa e o auge do período úmido, entre novembro e fevereiro, constituem a fase de maior sensibilidade climática do sinal isotópico. Nesse intervalo, o balanço entre a reposição de água no solo e a demanda evaporativa da atmosfera regula a abertura dos estômatos, a concentração interna de CO_2 e, conseqüentemente, a assinatura de $\Delta^{13}\text{C}$ registrada nos anéis de crescimento. As características anatômicas, hidráulicas, fenológicas e radiculares de cada espécie modulam essa resposta, explicando a elevada variabilidade individual nas séries originais. Entretanto, após a remoção das tendências de longo prazo, emerge um sinal interanual compartilhado, demonstrando que a disponibilidade hídrica e o DPV atuam como importantes fatores comuns sobre o funcionamento ecofisiológico das árvores.

7. CONCLUSÃO

Nesse estudo foi possível desenvolver uma cronologia anual de $\Delta^{13}\text{C}$ para *Cedrela fissilis* Vell. em um ambiente de Floresta Tropical Sazonalmente Seca. A cronologia construída se mostrou consistente e revelou correlações significativas com o clima, destacando a precipitação como propulsor de controle do sinal isotópico.

Os resultados confirmaram que as variações interanuais do $\Delta^{13}\text{C}$ respondem principalmente à disponibilidade hídrica, corroborando a primeira hipótese. A segunda hipótese também foi corroborada, visto que a cronologia de $\Delta^{13}\text{C}$ forneceu informações às cronologias de largura de anéis, ajudando na compreensão das respostas fisiológicas da espécie às variações climáticas. Por fim, os resultados indicam que o registro isotópico anual reflete tanto a resposta climática comum quanto a variabilidade fisiológica entre indivíduos, reforçando a importância de amostragens mais amplas e de abordagens multiespécies.

8. REFERÊNCIAS

Bird, M. I., et al. Stable isotope proxy records in tropical terrestrial environments.

Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, v. 538, 2020. Doi:

<https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2019.109445>

Burger, L. M. e Richter, H. G. Anatomia da Madeira. Nobel, São Paulo. 1991.

Cullen, L. E. e Macfarlane, C. Comparison of cellulose extraction methods for analysis of stable isotope ratios of carbon and oxygen in plant material. Tree Physiology, v. 25, p. 563 569, 2005.

Dong, H., et al. Discussion about stable carbon isotopic composition indicates large presence of maize in Brazilian soy sauces (shoyu)Response to “Discussion about stable carbon isotopic composition indicates large presence of maize in Brazilian soy sauces (shoyu)”. Journal of Food Composition and Analysis, v. 79, 2019. Doi:

<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2018.12.003> 27

Farrapo, C. L. Avaliação de isótopos estáveis nos anéis de crescimento de árvores do gênero *Cedrela* da floresta amazônica e da caatinga. Tese de doutorado. Lavras-MG, 2019.

Farquhar, G. D., Ehleringer, J. R. e Hubick, K. T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 40, p.503-537, 1989.

Fontana, C., et al. A new chronology of *Cedrela fissilis* (Meliaceae) for Southern Brazil: Combining classical dendrochronology and radiocarbon dating. *Dendrochronologia*, v. 85, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2024.126214>

Foroozan, Z., Pourtahmasi, K., Bräuning, A., 2018. Climatic signals in stable carbon isotope ratios of Juniper and Oak tree rings from northern Iran. *Global and Planet. Change* 165, 90-99.

Granato-Souza, D., et al. Tree rings and rainfall in the equatorial Amazon. *Climate Dynamics*. 2018. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4227-y>

Griffin, J. N., et al. Demystifying the tropics: FTIR characterization of pantropical woods and their α -cellulose extracts for past atmospheric ^{14}C reconstructions. *Science of the Total Environment*, v. 949, 2024. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175010>

Leavitt, S. W. e Roden, J. Isotope Dendrochronology: Historical Perspective. *Stable Isotopes in Tree Rings, Tree Physiology* 8. 2022. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_1

Leavitt, S. W. Tree-ring C–H–O isotope variability and sampling. *Science of the Total Environment*, v. 408, 2010. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.057>

M. Kohn. Carbon isotope compositions of terrestrial C_3 plants as indicators of (paleo)ecology and (paleo)climate. *PNAS*, v, 107, n, 46, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1073/pnas.1004933107>

Martinelli, L. A., et al. Determining ecosystem functioning in Brazilian biomes through foliar carbon and nitrogen concentrations and stable isotope ratios. *Biogeochemistry*, 2021. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10533-020-00714-2>

McCarrol, D., Loader, N. J. .Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, v. 23, p. 771-801, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2003.06.017>

Miller, D. L., et al. Tree-ring isotope records of tropical cyclone activity. *PNAS*, v. 103, n. 39, 2006. Doi: 10.1073pnas.0606549103

Nardoto, G. B. Increased in carbon isotope ratios of Brazilian fingernails are correlated with increased in socioeconomic status. *npj Science of Food*, v. 4, n. 9, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41538-020-0069-1>

Pearson, K. Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, v. 58, p. 240-242, 1895.

Pereira, G. A. Dendroclimatology in seasonally dry tropical forests in the São Francisco basin, Brazil. Tese de doutorado, Universidade Federal de Lavras. Lavras-MG. 2018.

Pereira, G. A., et al. The climate response of *Cedrela fissilis* annual ring width in the Rio São Francisco Basin, Brazil. *Tree-Ring Research*, v. 74, n. 2, p. 162–171, 2018. Doi: <https://doi.org/10.3959/1536-1098-74.2.162>

Pereira, G. A., et al.. NOAA/WDS Paleoclimatology – Pereira – Juvenília – CEFI – ITRDB BRA002. NOAA National Centers for Environmental Information, 2018. Doi: <https://doi.org/10.25921/wc5w-y858>.

Rathgeber, C. B. K., et al. Anatomical, Developmental and Physiological Bases of Tree-Ring Formation in Relation to Environmental Factors. *Stable Isotopes in Tree Rings, Tree Physiology* 8, 2022. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92698-4_3 28

Rodriguez, D. R. O. Climate change in the southern Amazonian Tropical Forest assessed by dendrochronological multiproxy. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo. Piracicaba SP, 2023.

Santo, L. S. B. dos, et al. Dendroclimatology of *Cedrela fissilis* Vell. and *Copaifera langsdorffii* Desf. in an Urban Forest Under Cerrado Domain. *Forests*, v. 16, n. 289, 2025. Doi: <https://doi.org/10.3390/f16020289>

Schleser, G. H., et al. Stable carbon isotope ratios of tree-ring cellulose from the site network of the EU-Project 'ISONET'. GFZ Data Services, 2022. Doi: doi.org/10.5880/GFZ.4.3.2023.002

Schöngart, J. et al. Dendroecological Studies in the Neotropics: History, Status and Future Challenges. *Dendroecology, Ecological Studies* 231, 2017. Doi: 10.1007/978-3-319-61669 8_3

Sheppard, P. R. Dendroclimatology: extracting climate from trees. *Focus Article*, 2010. Doi: 10.1002/wcc.42

Sleen, P. V. D., Zuidema, P. A., Pons, T. L. Stable isotopes in tropical tree rings: theory, methods and applications. *Functional Ecology*, v. 31, p. 1674–1689, 2017. Doi: 10.1111/1365-2435.12889

Sousa, L. K. V. S. Dendrocronologia aplicada no manejo de árvores de cedro (*Cedrela odorata*) L. e jatobá (*Hymenaea courbaril*) L. ocorrente na FLONA Tapajós-PA. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo. Piracicaba-SP, 2019.

von Caemmerer, S. & Evans, J. R. Temperature responses of mesophyll conductance differ greatly between species. *Plant, Cell and Environment*. V. 38, p. 629–637, 2025. Doi: 10.1111/pce.12449

Wieloch, T., et al. A novel device for batch-wise isolation of α -cellulose from small-amount wholewood samples. *Dendrochronologia*, v. 29, n. 2, p. 115-117, 2011. 2011. Doi: 10.1016/j.dendro.2010.08.008

Wright, C., et al. Plant functional types broadly describe water use strategies in the Caatinga, a seasonally dry tropical forest in northeast Brazil. *Ecology and Evolution*. V. 11, p. 11808-11825, 2021. Doi: 10.1002/ece3.7949

Zuidema, P. A., et al. Pantropical tree rings show small effects of drought on stem growth. *Dendrochronology*, 2025.